

**Technische Hochschule Lübeck**

Labor für Siedlungswasserwirtschaft



in Kooperation mit:

**Limbach Analytics GmbH**

Chemisches Laboratorium Lübeck (CLL)



*Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft,  
Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein*

## **Spurenstoffe und Multiresistente Bakterien in den Entwässerungssystemen Schleswig-Holsteins**

Ableitung von Kennwerten zur Quantifizierung der Herkunft,  
der Ausbreitung und des Rückhaltes – 2. Phase

**Abschlussbericht**

2020



**Projektbericht erarbeitet von:**

Kai Wellbrock<sup>1,\*</sup>, Sheetal Deshmukh<sup>1</sup>, Zeinab Kheshti<sup>1</sup>, Matthias Grottker<sup>1</sup>

**Unter Mitarbeit von:**

Volker Brockmann<sup>2</sup>, Christine Lindner<sup>2</sup>, Frank Blöcker<sup>1</sup>, Malika Heim<sup>1</sup>

**Beauftragt vom:**

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein

<sup>1</sup> Technische Hochschule Lübeck, Fachbereich Bauwesen, Labor für Siedlungswasserwirtschaft, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck

<sup>2</sup> Limbach Analytics GmbH, Chemisches Laboratorium Lübeck, Hochofenstraße 23-25, 23569 Lübeck

\* korrespondierender Autor: [kai.wellbrock@th-luebeck.de](mailto:kai.wellbrock@th-luebeck.de)

**Vorgeschlagene Zitierweise:**

Wellbrock, K.; Deshmukh, S.; Kheshti, Z.; Grottker, M. (2020): Spurenstoffe und Multiresistente Bakterien in den Entwässerungssystemen Schleswig-Holsteins - Ableitung von Kennwerten zur Quantifizierung der Herkunft, der Ausbreitung und des Rückhaltes. Abschlussbericht zur 2. Phase eines Forschungsvorhabens, gerichtet an das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, Lübeck/ Kiel, 2020.



## Kurzzusammenfassung

Für den Rückhalt anthropogener Spurenstoffe in der kommunalen Abwasserreinigung stellen die Sorption am Belebtschlamm sowie der biologische Abbau die dominierenden Mechanismen dar. Beide Prozesse lassen sich durch Modelle beschreiben. Zur Ermittlung der Eliminationsraten müssen die Biodegradationskonstante  $k_{bio}$  sowie der Sorptionskoeffizient  $k_d$  bekannt sein. Während des Betriebs von kommunalen Kläranlagen können beide Parameter nur abgeschätzt werden, da in der Regel die Stoffwechselfvorgänge in der Belebung durch Kreislaufströme (z. B. Trübwasser aus der Schlammbehandlung) beeinflusst wird. Daher werden die genannten Parameter daher häufig im Standversuch (Batch-Versuch) ermittelt. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den realen Kläranlagenbetrieb ist allerdings aufgrund der fehlenden kontinuierlichen Beschickung fraglich.

Vorliegende Studie greift diese Problematik auf und erweitert vorhandene Modelle zur statischen Bestimmung der genannten Kenngrößen, um in Durchlaufreaktoren dynamische Parameter zu bestimmen. Diese berücksichtigen insbesondere im Vergleich zu statischen Batch-Versuchen variierende Stofffrachten im Zulaufstrom und geben daher besser die dynamischen Vorgänge während der biologischen Behandlung von kommunalen Abwasser wieder, dessen Vorkommen gerade bei kleinen Gemeinden eine sehr deutliche tageszeitliche sowohl quantitative als auch qualitative Variation aufweist.

Der Einsatz von Metallsalzen erfolgt primär für die Fällung von Phosphat, welches kaum mittels ausschließlich biologischer Verfahren ausreichend aus dem Abwasser entfernt werden kann. Parallel werden Spurenstoffe infolge der durch die Gabe der Metallsalze erfolgenden Prozesse zurückgehalten. Die Studie geht auf die relevanten Mechanismen ein und beantwortet die Frage, welche Arten von Spurenstoffen gezielt durch diese Verfahren aus dem Wasserpfad eliminiert werden könnten. Schließlich erfolgt die Untersuchung des Einflusses der Gabe von üblichen Co-Substraten auf die Nachweisbarkeit von Spurenstoffe.

## Abstract

Sorption on activated sludge and biological degradation are the dominant mechanisms for the retention of anthropogenic micropollutants in municipal wastewater treatment. Models can describe both processes. To determine the elimination rates, the biodegradation constant  $k_{\text{bio}}$  and the partition coefficient  $k_d$  must be known. Both parameters can only be estimated during the operation of municipal wastewater treatment plants, since the metabolic processes in the activated sludge tank are usually influenced by circulating currents (e.g. sludge water from sludge treatment). Therefore, the parameters mentioned are often determined in a batch test. The transferability of these results to the operation of a real sewage treatment plant is questionable due to the lack of continuous loading.

This study takes up this problem and expands existing models for the static determination of the mentioned parameters in order to determine dynamic parameters in continuously fed reactors. These take into account, in particular, fluctuating material loads in the inflow stream compared to static batch tests and therefore better reflect the dynamic processes during the biological treatment of municipal wastewater, the occurrence of which, particularly in small communities, shows a very clear variation in time, both quantitative and qualitative.

Metal salts are primarily used for the precipitation of phosphate, which can hardly be adequately removed from the wastewater using exclusively biological processes. At the same time, micropollutants are removed due to the processes caused by the administration of the metal salts. The study looks at the relevant mechanisms and answers the question of which types of micropollutants could be deliberately eliminated from the water path using these processes. Finally, the influence of conventional co-substrates on the detectability of Micropollutants is examined.



# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XV</b>
<b>FORMELZEICHEN.....</b>	<b>XV</b>
<b>1 VERANLASSUNG UND ZIELE .....</b>	<b>1</b>
1.1 Vorwort.....	1
1.2 Ziel der Studie .....	1
<b>2 GRUNDLAGEN DES SPURENSTOFF-RÜCKHALTES .....</b>	<b>3</b>
2.1 Biologischer Abbau.....	3
2.2 Sorption .....	5
2.3 Verflüchtigung/ Strippung .....	7
2.4 Abiotischer Abbau.....	8
2.4.1 Photolyse .....	9
2.4.2 Hydrolyse .....	9
2.5 Fällung und Flockung.....	9
2.6 Einteilung in Stoffgruppen.....	13
<b>3 METHODEN .....</b>	<b>15</b>
3.1 Laborversuche .....	15
3.1.1 Versuchsreihe 1: Fällmittel.....	15
3.1.2 Versuchsreihe 2: Co-Substrate .....	17
3.2 Bestimmung der Sorption am Belebtschlamm.....	18
3.3 Bestimmung des biologischen Abbaus .....	20
3.4 Bestimmung von Begleitparametern .....	22
3.5 Bestimmung von Spurenstoff-Konzentrationen.....	23
<b>4 ERGEBNISSE .....</b>	<b>29</b>
4.1 Fällversuche.....	29
4.1.1 Einfluss auf Nähr- und Zehrstoffe .....	29
4.1.2 Einfluss auf Spurenstoffe .....	31
4.1.3 Einfluss auf die Verteilung der Hauptionen und Ionenbilanz .....	34
4.1.4 Zusammenfassung und Diskussion .....	35
4.2 Einfluss der Co-Substrat-Gabe .....	40
4.2.1 Einfluss auf Nähr- und Zehrstoffe .....	40
4.2.2 Einfluss auf Spurenstoffe .....	41

4.2.3	Einfluss auf die Verteilung der Hauptionen und Ionenbilanz .....	42
4.2.4	Zusammenfassung und Diskussion .....	42
4.3	Versuchsreihe zum Sorptionsverhalten .....	47
4.3.1	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung.....	50
4.3.2	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm .....	52
4.3.3	Einfluss des Schlammalter .....	54
4.3.4	Einfluss der Schlammbelastung.....	55
4.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Sorptionsverhalten .....	55
4.4	Versuchsreihe zum biologischen Abbau .....	58
4.4.1	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung.....	60
4.4.2	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm .....	61
4.4.3	Einfluss des Schlammalters und der Schlammbelastung.....	62
4.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zum biologischen Abbau.....	64
4.5	Vergleich der Ergebnisse beider Projektphasen .....	66
<b>5</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>68</b>
5.1	Überprüfung der Stoffgruppen-Einteilung.....	68
5.1.1	Stoffgruppe I (nicht abbaubare, nicht sorptive Stoffe).....	68
5.1.2	Stoffgruppe II (nicht abbaubare, sorptive Stoffe).....	69
5.1.3	Stoffgruppe III (mäßig abbaubare, nicht sorptive Stoffe) .....	70
5.1.4	Stoffgruppe IV (mäßig abbaubare, sorptive Stoffe).....	74
5.1.5	Stoffgruppe V (gut abbaubare, nicht sorptive Stoffe) .....	74
5.2	Zusammenstellung charakteristischer Kennwerte .....	76
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN .....</b>	<b>78</b>
6.1	Ableitung von Leitparametern .....	78
6.2	Betriebliche und praktische Empfehlungen .....	81
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>88</b>
Anhang 1	Ergebnisse der Fällversuche	89
Anhang 2	Ergebnisse der Co-Substrat-Gabe	141
Anhang 3	Sorptionskoeffizienten $k_d$	169
Anhang 4	Biodegradationskonstanten $k_{bio}$	221
Anhang 5	Vergleich der Ergebnisse beider Projektphasen	251

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptmechanismen für die Entfernung von Spurenstoffen aus Abwasser in konventionellen Belebungsanlagen am Beispiel von Moschus-Galaxolid.....	3
Abbildung 2: Mechanismen bei der Fällung und Flockung, die zum Rückhalt von Spurenstoffen beitragen können.....	10
Abbildung 3: Darstellung der Potentialkurven nach der DLVO-Theorie.....	11
Abbildung 4: Arbeitsablauf der Versuchsreihen zur Bestimmung des Einflusses der Fällmittelgabe und der Co-Substrate.....	16
Abbildung 5: Messpunkte auf der VAK zur Bestimmung der Sorption von Spurenstoffen im Belebtschlamm.....	18
Abbildung 6: Arbeitsablauf zur Bestimmung der Sorption an Belebtschlamm.....	19
Abbildung 7: Messpunkte auf der Modellkläranlage zur Bestimmung des betrieblichen Einflusses auf den biologischen Abbau von Spurenstoffen.....	20
Abbildung 8: Arbeitsablauf zur Bestimmung des biologischen Abbaus.....	21
Abbildung 9: Piper-Diagramm (Kationenverteilung) für die Nullproben.....	35
Abbildung 10: Eliminationsraten der Fällversuche.....	39
Abbildung 11: Eliminationsraten der Versuchsreihe zur Co-Substrat-Gabe.....	45
Abbildung 12: Vergleich der in beiden Messwochen ermittelten Sorptionskoeffizienten (gestrichelt ist die Linie gleicher Werte).....	47
Abbildung 13: Gegenüberstellung von Sorptionskoeffizienten und Zulaufkonzentrationen (Sorptionen-Isotherme).....	47
Abbildung 14: Gegenüberstellung der mittleren Sorptionskoeffizienten für beide Messwochen, geordnet nach Stoffklassen.....	48
Abbildung 15: Gegenüberstellung der mittleren Sorptionskoeffizienten für beide Messwochen, geordnet nach Stoffgruppen.....	49
Abbildung 16: Zusammenstellung der festgestellten Konzentrationen und des Sorptionskoeffizienten für Glyphosat, Messwoche 2.....	50
Abbildung 17: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe II. A: Nickel, B: Benzo[a]anthracen.....	51
Abbildung 18: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe IV. A: Flouren, B: Acenaphten.....	51
Abbildung 19: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe I. A: Carbamazepin, B: Imidacloprid.....	52
Abbildung 20: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm A: Carbamazepin (Stoffgruppe I), B: Imidacloprid (Stoffgruppe III).....	53
Abbildung 21: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm A: Nickel (Stoffgruppe II), B: Fluoren (Stoffgruppe IV).....	54
Abbildung 22: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schlammalters für Substanzen der Stoffgruppe I. A: Carbamazepin. B: Terbutryn.....	54
Abbildung 23: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schlammalters. A: Benzo[ghi]perylen (Stoffgruppe II), B: Acenaphten (Stoffgruppe IV).....	55
Abbildung 24: Zusammenstellung der ermittelten dynamischen Biodegradationskonstanten $k_{\text{bio,dyn}}$ für beide Versuchsanlagen.....	59
Abbildung 25: Gegenüberstellung der Biodegradationskonstanten beider Versuchsanlagen.....	59

Abbildung 26: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung .....	60
Abbildung 27: Ähnlichkeit der Betriebsparameter. A: Abhängigkeit der TS-Gehalte im Überschussschlamm und in der Belebung. B: Korrelation der Korrelationskoeffizienten.....	61
Abbildung 28: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm. ....	62
Abbildung 29: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Schlammalters.....	63
Abbildung 30: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit der Schlammbelastung.....	64
Abbildung 31: Vergleich der Konzentrationen aus beiden Projektphasen.....	66
Abbildung 32: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe I.....	69
Abbildung 33: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe II. ....	70
Abbildung 34: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe III (Teil 1). ....	71
Abbildung 35: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe III (Teil 2). ....	73
Abbildung 36: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe V. ....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften üblicher Fällmittel.....	12
Tabelle 2: Gruppeneinteilung der untersuchten Spurenstoffe nach Eliminationsmechanismen in Belebtschlammanlagen. ....	14
Tabelle 3: Co-Substrat-Dosierungen [mL/L].....	17
Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Stellgrößen der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten (gemittelt über Proben-Zeiträume). ....	19
Tabelle 5: Zusammenstellung der wichtigsten Betriebsparameter der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten (gemittelt über Versuchsdauer). ....	20
Tabelle 6: Stellgrößen für die Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus. ....	21
Tabelle 7: Betriebsparameter (Mittelwerte) für die Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus. ....	22
Tabelle 8: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Schwermetalle. .	23
Tabelle 9: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Arzneistoffe. ....	23
Tabelle 10: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Pflanzenschutzmittel. ....	24
Tabelle 11: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). ....	25
Tabelle 12: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen sonstiger untersuchter Stoffe. ....	25
Tabelle 13: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der Hauptionen. ....	26
Tabelle 14: Lineare Korrelationskoeffizienten $r^2$ für die Korrelation der Fällmitteldosierung mit der nachweisbaren Rest-Konzentration. ....	37
Tabelle 15: Zusammenstellung der infolge Fällmittelgabe erreichbaren Eliminationsraten. ...	38
Tabelle 16: Lineare Korrelationskoeffizienten $r^2$ für die Korrelation der Co-Substrat-Dosierung mit der nachweisbaren Rest-Konzentration. ....	43
Tabelle 17: Zusammenstellung der analytisch auffälligen Stoffe bei Gabe von Co-Substraten und maximale Eliminationsraten. ....	44
Tabelle 18: Zusammenstellung von Probenahmestellen der 1. Projektphase deren Analyseergebnisse ggf. neu bewertet werden müssen. ....	46
Tabelle 19: Lineare Korrelationskoeffizienten $r^2$ für die Korrelation des Sorptionskoeffizienten $k_d$ mit unterschiedlichen Betriebsparametern. ....	56
Tabelle 20: Qualitative Bewertung der relevanten Betriebsparameter auf den Rückhalt von Vertretern der unterschiedlichen Stoffgruppen. ....	57
Tabelle 21: Lineare Korrelationskoeffizienten $r^2$ für die Korrelation der Biodegradationskonstanten $k_{bio}$ mit unterschiedlichen Betriebsparametern. ....	65
Tabelle 22: Statistische Auswertung der ermittelten Biodegradationskonstanten $k_{bio,dyn}$ [L/g TS * d]. ....	76
Tabelle 23: Statistische Auswertung der ermittelten Sorptionskoeffizienten $k_d$ [L/kg TS]. ....	77
Tabelle 24: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe I). ....	79
Tabelle 25: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe II). ....	79
Tabelle 26: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe III). ....	80
Tabelle 27: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe IV). ....	81

Tabelle 28: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe V) .....81

## Abkürzungsverzeichnis

BSB <sub>5</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BG	Bestimmungsgrenze
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
GC MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
LC MS	Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung
n.d.	keine Daten/ Auswertung nicht möglich
n.g.	nicht gemessen
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
PNS	Probenahmestelle
PSM	Pflanzenschutzmittel
TS	Trockensubstanzgehalt
UQN	Umweltqualitätsnorm

## Formelzeichen

$B_{d,BSB5}$	BSB <sub>5</sub> -Tagesfracht [kg O <sub>2</sub> / d]
$B_{TS}$	Schlammbelastung [kg O <sub>2</sub> / (kg TS × d)]
$B_{d,TS,ÜS}$	tägliche Schlammproduktion [kg TS / d]
$B_{R,BSB5}$	tägliche BSB <sub>5</sub> -Raumbelastung [kg O <sub>2</sub> / (m <sup>3</sup> × d)]
$E$	Eliminationsrate [%]
$h_N$	Niederschlagshöhe [mm]
$k_{bio}$	Biodegradationskonstante [L / (g TS × d)]
$k_{bio,dyn}$	dynamische Biodegradationskonstante [L / (g TS × d)]
$k_d$	Sorptionskoeffizient [L / (g TS)]
$k_{OW}$	Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient [-]
$k_{aw}$	Luft-Wasser-Verteilungskoeffizient [-]
$m_{TS}$	Schlammmasse (in der Belebung) [kg]
$Q$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> / d]
$q_A$	Flächenbeschickung [m/h]
$t_H$	Aufenthaltszeit [h]
$t_{TS}$	Schlammalter (in der Belebung) [d]
$V_{BB}$	Volumen der Belebung [m <sup>3</sup> ]
$X_{TS}$	Konzentration des TS in der Belebung [kg TS / m <sup>3</sup> ]



# 1 Veranlassung und Ziele

## 1.1 Vorwort<sup>1</sup>

Im Forschungsvorhaben „Spurenstoffe und Multiresistente Bakterien in den Entwässerungssystemen Schleswig-Holsteins - Ableitung von Kennwerten zur Quantifizierung der Herkunft, der Ausbreitung und des Rückhaltes“ wurden seit April 2017 insgesamt acht Kläranlagen hinsichtlich einer Elimination von Spurenstoffen sowie des Rückhaltes von multiresistenten Keimen untersucht (Projektlaufzeit bis Ende Juni 2019). Ziel dieser Untersuchungen war die Ableitung spezifischer Kennwerte für das Auftreten von Spurenstoffen im Rohabwasser sowie die Quantifizierung der verfahrensspezifischen Elimination von Spurenstoffen und multiresistenten Keime. Der Projektbericht wurde 2019 vorgelegt. Er stellt eine wesentliche Grundlage für den hier vorliegenden Bericht dar, der die Ergebnisse einer zweiten Projektphase umfasst. Um Doppelungen zu vermeiden, werden viele einleitende Kapitel (etwa zu rechtlichen Rahmenbedingungen, vorherige Projekte in Deutschland mit ähnlichem Fokus etc.) nicht wiederholt. Die theoretischen Grundlagen zum Spurenstoff-Rückhalt (hier: Abs. 2) werden hingegen, da sie wesentlich für das Verständnis der Ergebnisdiskussion sind, wiederholt. Die Ausführungen wurden nach Bedarf angepasst und aktualisiert. Der Abschnitt zu den theoretischen Grundlagen zur Fällung und Flockung (Abs. 2.5) ist neu hinzugekommen, da er einen inhaltlichen Schwerpunkt des zweiten Projektabschnittes darstellt.

Der Ablauf der acht bisher untersuchten Kläranlagen weist messbare Konzentrationen vieler Spurenstoffe auf. Daher ist eine Identifizierung der Eliminierungswege essentiell, um eine Lösung für einen bestmöglichen Rückhalt aller Spurenstoffe zu finden. Biologischer Abbau und Sorption sind Standardmechanismen und daher gut erforscht und modelliert. Beide Prozesse sind die Haupteliminationsmechanismen in der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung, bei denen Kläranlagen meist dem Stand der Technik entsprechend als Belebungsanlage ausgebaut sind. Die Diskrepanz bei den Betriebsbedingungen, den Eigenschaften der Behandlungsanlagen und den anfänglichen Konzentrationen der Spurenstoffe macht es jedoch schwierig, typische Werte oder sogar ein spezifisches Entfernungsmodell zu erstellen. Aus diesem Grund ist es notwendig weitergehende Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ ) und der Biodegradationskonstanten ( $K_{bio}$ ) durchzuführen. Mit dem vorliegenden Projektbericht werden diese Themenkomplexe im Detail untersucht.

## 1.2 Ziel der Studie

Das Projekt ergänzt eine erste Projektphase, welche das Vorhandensein, die Quantifizierung und den Rückhalt von Spurenstoffen zum Ziel hatte. Es lassen sich darüber hinaus gehende Ziele definieren:

- **Erarbeitung naturwissenschaftlich begründeter Grundlagen und Modellgesetze zur Elimination von Spurenstoffen in der Abwasserreinigung:** Hierfür ist die Ergänzung um Messungen zur Bestimmung der Sorption am Belebtschlamm und des biologischen Abbaus unter kontrollierten, ungestörten Bedingungen geplant. Bei Kenntnis der chemischen Eigenschaften anderer Spurenstoffe, wären die Projektergebnisse somit auf diese übertragbar.
- **Ermittlung des spezifischen Einflusses der Fällung auf den Spurenstoff-Rückhalt sowie Untersuchung analytischer Probleme bei Zugabe von Co-Substraten.**

---

<sup>1</sup> Die Autoren danken für die Unterstützung durch das MELUND (A. Steffens) und dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) des Landes Schleswig-Holstein (S. Schwarz).

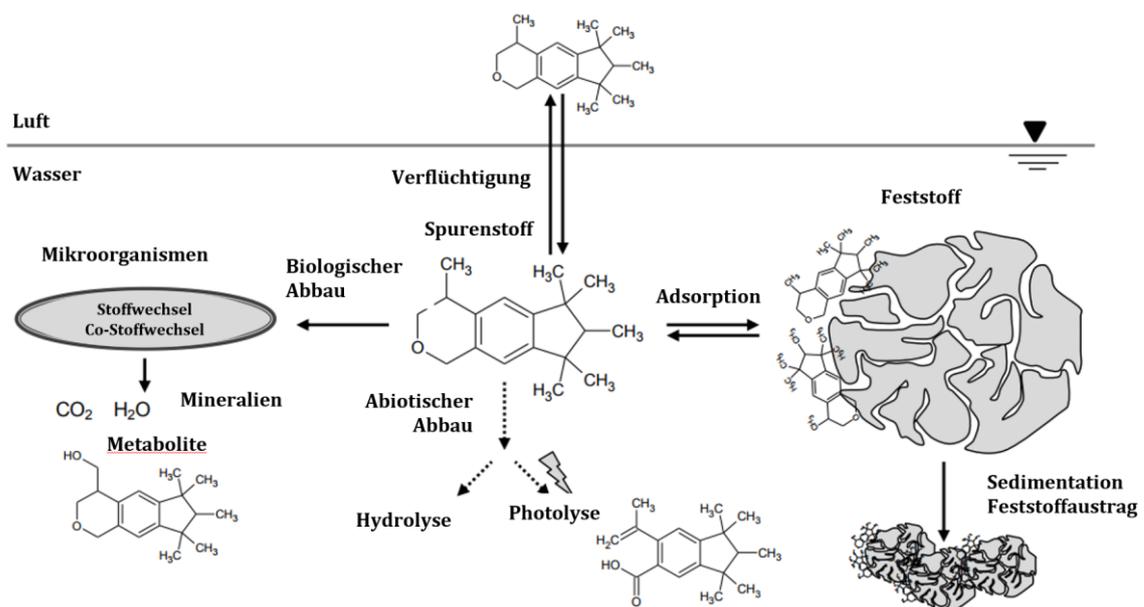
Die Daten aus dem vorherigen Forschungsvorhaben sind die Basis für weitergehende, ergänzende Fragestellungen, die über die ursprünglichen Projektziele hinausgehen. Folgende Vorteile ergeben sich bei Erreichen der Projektziele:

- Es soll eine **integrierte Abschätzung der emittierten Stofffrachten** vorhandener Kläranlagen (mit Bezug auf schleswig-holsteinische Besonderheiten) ermöglicht werden.
- Die **Planung von Aus- und Umbauten bzw. Modernisierungen** vorhandener Kläranlagen kann vor dem Hintergrund eines verbesserten Spurenstoff-Rückhalts erfolgen.
- Zudem werden **betriebliche Parameter** identifiziert, die ohne bauliche oder strukturelle Maßnahmen einen verbesserten Spurenstoffrückhalt ermöglichen (z. B. Anpassung der Fällmittelgaben, gesonderte Behandlung von Trübwasser, häufigere Spülintervalle in Filtrationsstufen etc.).
- Integration der Ergebnisse in den Generalplan Abwasser des Landes Schleswig-Holstein.

## 2 Grundlagen des Spurenstoff-Rückhaltes

Um das Verhalten von Spurenstoffen während der Abwasserreinigung zu charakterisieren, ist die Kenntnis verschiedener chemisch-physikalischer Eigenschaften notwendig. Hierzu zählen die Molekülstruktur, die Polarität bzw. die Hydrophobie, die Sorptionsfähigkeit, die Abbaubarkeit bzw. die Persistenz und die Flüchtigkeit. Relevant für die dem Stand der Technik entsprechende Abwasserreinigung (1. bis 3. Reinigungsstufe) sind die Sorption von Spurenstoffen (z. B. am Klärschlamm oder an anderen Feststoffen wie dem Rechengut) und der biologische Abbau (Abbildung 1). Die Verflüchtigung sowie die Photolyse spielen nur für wenige Stoffe eine nennenswerte Rolle (Wick et al. 2009).

Anhand geeigneter Modelle können die Sorption und der biologische Abbau abgeschätzt werden. Dafür müssen allerdings die spezifischen Sorptionskoeffizienten und die Biodegradationskonstanten für jeden der analysierten Spurenstoffe bekannt sein.



**Abbildung 1: Hauptmechanismen für die Entfernung von Spurenstoffen aus Abwasser in konventionellen Belebungsanlagen am Beispiel von Moschus-Galaxolid.**  
(verändert nach Margot 2015, Fig. 2.2).

### 2.1 Biologischer Abbau

Beim biologischen Abbau (oder der biotischen Transformation) erfolgt die Umwandlung der Substanzen durch enzymatisch gesteuerte Reaktionen, die auf mikrobielle Prozesse zurückzuführen sind. Als Persistenz wird die Langlebigkeit einer Substanz in der (aquatischen) Umwelt bezeichnet. Spurenstoffe liegen im Abwasser in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor. Das führt dazu, dass diese Stoffe von den Mikroorganismen nicht als primäres Substrat angesprochen werden. Wie Schwarzenbach et al. (2017) ausführen, handelt es sich um eine Reaktion pseudo-erster Ordnung, die von einer weiteren veränderlichen Größe abhängt. Das bedeutet, dass die Umsatzrate proportional zur im Abwasser vorhandenen Konzentration eines Stoffes ist. Wie Beier (2010) ausführt, ist die Transformationsrate aber auch vom Trockensubstanzgehalt TS abhängig und lässt sich nach Gleichung 1 beschreiben (s. hierzu auch: Joss et al. 2006; Schwarzenbach et al. 2017).

$$\frac{dc_w}{dt} = -k_{bio} \times TS \times c_w \quad (1a)$$

- mit:  $c_w$  = Anfangskonzentration in der gelösten Phase [ $\mu\text{g} / \text{L}$ ]  
 $t$  = hydraulische Aufenthaltszeit bzw. Dauer [d]  
 $k_{bio}$  = Biologische Transformationskonstante/ Biodegradationskonstante  
 [L / (g TS  $\times$  d)]  
 $TS$  = Trockensubstanzgehalt [g TS / L]

Gleichung 1 muss über die Zeit  $t$  integriert werden. Hierbei ist die mittlere Aufenthaltszeit im Wasserpfad zu berücksichtigen. Diese beträgt etwa 24 Stunden. Zur Ermittlung des biologischen Abbaus ist ferner der Anteil zu berücksichtigen, der infolge Sorption im Belebtschlamm verbleibt. Es ergibt sich schließlich folgende Gleichung, die der Auswertung zugrunde liegt (vgl. Joss et al. 2006, dort Gleichung 4 mit der entsprechender Herleitung):

$$k_{bio,dyn} = (1 + k_d \times X_{TS,\ddot{u}S}) \times \frac{\ln((c_{Zu})/(c_{Ab+1}))}{X_{TS,\ddot{u}S} \times t} \quad (1b)$$

Hierin ist  $k_d$  der nach Gleichung 5 (Abs. 2.2) ermittelte Sorptionskoeffizient,  $X_{TS,\ddot{u}S}$  ist die Stoffkonzentration im homogenisierten Überschussschlamm,  $c_{Zu}$  ist die Konzentration im Zulauf zur Belebungsstufe,  $c_{Ab+1}$  ist die Ablaufkonzentration, die einen Tag später (entsprechend er mittleren hydraulischen Aufenthaltszeit) ermittelt wurde. Die Zeit  $t$  entspricht der mittleren Aufenthaltszeit zwischen Zu- und Ablauf (hier 1 Tag).

Üblicherweise werden Biodegradationskonstanten  $k_{bio}$  für einzelne Spurenstoffe im Batch-Versuch bestimmt, indem eine definierte Menge eines (ggf. synthetischen) Abwassers mit definierter Anfangskonzentration in Kontakt mit Belebtschlamm gebracht wird und nach vorgegebener Dauer (meist 1 Tag) die verbleibende Restkonzentration bestimmt wird. Dieses Vorgehen ist nicht direkt auf Belebungsanlagen übertragbar, die permanent mit Rohabwasser beschickt werden. Es werden daher in dieser Projektstudie dynamische Biodegradationskonstanten  $k_{bio,dyn}$  im laufenden Betrieb ermittelt. Diese schließen während des Messintervalls  $t$  eine durchgängige, möglichst konstante Beschickung mit Rohabwasser ein. Das führt dazu, dass ein Teil der zugehenden Stofffracht stets direkt den Ablauf erreicht. Im Vergleich zum statischen Batch-Versuch ist somit die verbleibende Restkonzentration nach 1 Tag ( $c_{Ab+1}$  in Gleichung 1b) in der dynamischen Versuchsanordnung größer. Der Quotient [ $c_{Zu}/c_{Ab+1}$ ] ist dann kleiner. Folglich sind dynamische  $k_{bio}$ -Werte kleiner als die üblicherweise in Batch-Versuchen ermittelten ( $k_{bio,dyn} < k_{bio,Batch}$ ). Relativ zueinander verschieben sich beide Größen allerdings nicht.

Ist also die Biodegradationskonstante  $k_{bio}$  bekannt, so kann mit Kenntnis des TS-Gehaltes der durch biologischen Abbau umgesetzte Anteil eines Spurenstoffes abgeschätzt werden. Der biologische Abbau von Arzneistoffen und weiteren organischen Verbindungen in der biologischen Abwasserreinigung ist gelegentlich untersucht worden (Wick et al. 2009; Joss et al. 2006). Joss et al. (2006) unterscheiden dabei wie folgt:

- *nicht relevanter biologischer Abbau* (< 20 %) für  $k_{bio} < 0,1$  L / (g TS  $\times$  d)
- *moderater biologischer Abbau* (20 bis 90 %) für  $0,1 < k_{bio} < 10$  L / (g TS  $\times$  d)
- *guter biologischer Abbau* (> 90 %) für  $k_{bio} > 10$  L / (g TS  $\times$  d)

Suarez et al. (2010) nennen hiervon abweichende Grenzen:

- *kaum oder nicht biologisch abbaubar* für  $k_{bio} < 0,5$  L / (g TS  $\times$  d)
- *mäßig biologisch abbaubar* für  $0,5 < k_{bio} < 1$  L / (g TS  $\times$  d)
- *gut biologisch abbaubar* für  $1 < k_{bio} < 5$  L / (g TS  $\times$  d)
- *sehr gut biologisch abbaubar* für  $k_{bio} > 5$  L / (g TS  $\times$  d)

Der biologische Abbau von Spurenstoffen hängt dabei von weiteren Faktoren ab. Generell kann eine Erhöhung des Schlammalters eine verbesserte Elimination von Spurenstoffen bedingen

(Kreuzinger et al. 2004, Clara et al. 2005; Joss et al. 2006; Stasinakis et al. 2010). Dieses wird darauf zurückgeführt, dass sich entsprechende Mikroorganismen anreichern, die Enzyme für den biologischen Abbau benötigen (Jones et al. 2007). Des Weiteren spielen die Temperatur (Castiglioni et al. 2006; Vieno et al. 2005) sowie die Verdünnung des Abwassers durch Regen- oder Fremdwasser eine Rolle (Ternes 1998; Tauxe-Wuersch et al. 2005; Joss et al. 2006). Schließlich haben Tauxe-Wuersch et al. (2005) gezeigt, dass auch die hydraulische Aufenthaltszeit einen Einfluss auf den biologischen Abbau von Spurenstoffen hat (vgl. hierzu auch Gleichung 1).

Weitere Hinweise zur Verbesserung des biologischen Abbaus beim Belebtschlammverfahren (z. B. durch Einstellung des pH-Wertes oder eine Temperierung) werden in der Literatur genannt (u. a. Kasprzyk-Hordern et al. 2009; Margot 2015; Völker 2017), sind aber im Rahmen der in dieser Studie untersuchten Betriebsparameter irrelevant, da diese nicht variiert werden konnten.

Wie Gleichung 1 zeigt, ist der biologische Abbau proportional zur Anzahl der Mikroorganismen (indirekt angegeben über den Trockensubstanzgehalt  $TS$ ) und der Konzentration der gelösten Stoffe  $c_w$ . Wird von einem konstanter  $TS$  ausgegangen, kann die verbleibende Konzentration  $c(t)$  nach einer Reaktionszeit  $t$  aus Gleichung 1 abgeleitet werden zu (vgl. Joss et al. 2006):

$$c(t) = c_w \times e^{(-k_{bio} \times TS \times t)} \quad (2)$$

Wird Sorption oder Verflüchtigung ausgeschlossen, kann der durch biologischen Abbau reduzierte Anteil  $y_{bio}$  bestimmt werden mit:

$$y_{bio} = 1 - \frac{c(t)}{c_w} = 1 - e^{(-k_{bio} \times TS \times t)} \quad (3)$$

Wie Kruglova et al. (2014) ausführen, ist die Transformationsrate  $k_{bio}$  für jeden Spurenstoff empirisch zu bestimmen. Hierbei können sich die Umsetzungsraten für jeden Verfahrenstyp (z.B. Durchlaufbelebung, SBR-Anlage etc.) unterscheiden.

## 2.2 Sorption

Die Sorptionsfähigkeit eines Stoffes wird unter anderem durch seine Polarität beschrieben, die die Elektronenverteilung innerhalb einer Verbindung beschreibt. Liegt eine polare Verbindung vor, weist diese eine ungleichmäßige Elektronenverteilung auf. Diese Stoffe zeichnen sich durch eine hohe Wasserlöslichkeit aus. Im Gegensatz dazu beschreibt die Hydrophobie die Fähigkeit von Molekülen, Wechselwirkungen mit anderen hydrophoben Molekülen einzugehen. Sie sind daher schlecht wasserlöslich. Zur Abschätzung der Hydrophobie wird der Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient  $K_{OW}$  herangezogen (in der Literatur häufig als dekadischer Logarithmus  $\log K_{OW}$  angegeben). In der Abwasserreinigung wird der  $K_{OW}$ -Wert häufig zur Abschätzung des Verhaltens eines Stoffes verwendet: Hohe  $K_{OW}$ -Werte zeigen an, dass ein Stoff lipophil ist und zur Adsorption an organischem Material (z. B. auch Belebtschlamm) neigt. Letzterer als Bioakkumulation bezeichneter Prozess wird bei  $\log K_{OW} > 4,5$  erwartet (vgl. Beier 2010).

Wie Ternes et al. (2003) gezeigt haben, ist der  $K_{OW}$ -Wert allerdings nur bedingt geeignet, um das Verhalten von Arzneistoffen in der biologischen Abwasserreinigung zu charakterisieren, da diese häufig eine polare, funktionelle Gruppe aufweisen und somit – abhängig vom pH-Wert – sowohl ionisiert als auch nicht-ionisiert vorliegen können.

Generell wird die Sorption einer Substanz durch eine chemische oder physikalische Bindung an einem Feststoff bedingt. Die vorgenannten Eigenschaften eines Stoffes sind dabei maßgebend. Ebenso sind die Eigenschaften der festen Phase (Belebtschlamm, Aktivkohle, Rechengut o. ä.) relevant. Hierbei ist zwischen der Absorption, bei der ein Molekül in eine dreidimensionale Matrix eindringt, und der Adsorption, bei der die Moleküle an der zweidimensionalen Oberfläche gebunden werden, zu unterscheiden. Es gilt, dass unpolare Verbindungen besonders gut absorbiert werden. Polare und ionisierbare Stoffe, die sehr gut wasserlöslich sind, adsorbieren hingegen nicht. Lediglich Moleküle mit positiv geladenen funktionellen Gruppen neigen zur Adsorption und können mit dem negativ geladenen Belebtschlamm oder der Aktivkohle aus dem Abwasser entfernt werden.

Die Sorption hängt somit nicht nur von den Eigenschaften des Spurenstoffes ab, sondern auch von der Adsorber-Eignung des Belebtschlammes (z. B. Oberflächenladung, spezifische Oberfläche, Anteil der extrazellulären polymeren Substanzen [EPS], Oxidationszahl der organischen Materie, Anteil mineralischer Masse). Es wurden daher unterschiedliche Adsorptionskoeffizienten am Belebtschlamm festgestellt, die abhängig sind von der Zusammensetzung des Abwassers und den Betriebsparametern (z. B. Schlammbelastung, Schlammalter, Trockensubstanzgehalt) der biologischen Stufe bzw. des Belebtschlammes (Barret et al. 2010a; Mailler et al. 2014; Margot 2015; Hyland et al. 2012; Stasinakis et al. 2010).

Die Sorption im Belebungsbecken basiert weitgehend auf elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen den positiv geladenen Spurenstoff-Ionen und den negativ geladenen Oberflächen von Mikroorganismen. Auf Überschussschlamm wird eine hohe Adsorption beobachtet, da Mikroorganismen hier den größeren Anteil der suspendierten Feststoffe darstellen, was zu einer höheren Sorptionsrate führt. Für Primärschlamm ist die Sorptionskonstante jedoch geringer, da dieser trotz gleicher Konzentration an suspendierten Feststoffen wesentlich weniger Mikroorganismen enthält, aber stattdessen einen großen Fettanteil aufweist.

Sorption ist generell umkehrbar. Dabei stehen Adsorption und Desorption für gewöhnlich in einem Gleichgewicht und finden parallel statt. Die Sorptionskinetik am Belebtschlamm ist ein schneller Prozess, der für hydrophobe PAKs und hydrophile Substanzen (wie polare Arzneistoffe und Pestizide) nach etwa 0,5 bis 2,0 Stunden einen Gleichgewichtszustand erreicht (Barret et al. 2010b, 2010b; Ternes et al. 2004; Wick et al. 2011). Da die hydraulische Aufenthaltszeit in der biologischen Abwasserreinigung in der Regel deutlich größer ist, kann von einem quasi-statischen Gleichgewichtszustand ausgegangen werden.

Betrachtet man eine Verbindung unter Sorptionsgleichgewichtsbedingungen (Sorptions-Desorptions-Gleichgewicht oder Verteilungsgleichgewicht), so kann man annehmen, dass die sorbierte Konzentration am Belebtschlamm  $c_{xs}$  proportional zur gelösten Konzentration  $c_w$  ist (Ternes et al. 2004; Pomiès et al. 2013).

$$(c_{xs}) = k_d \times TS c_w \quad (4)$$

Daher ist es möglich, den Sorptionskoeffizienten  $k_d$  unter Gleichgewichtsbedingungen zu definieren:

$$k_d = \frac{c_{xs}}{TS c_w} \quad [L / (g TS)] \quad (5)$$

Außerdem kann der durch Sorption entfernte Anteil der Spurenstoffe,  $\gamma_s$  [-], definiert werden als (vgl. Margot 2015):

$$\gamma_s = \frac{c_{xs} \times TS}{c_t} = \frac{k_d \times TS}{1 + k_d \times TS} \quad (6)$$

Hierbei ist  $c_{xs}$  die am Belebtschlamm sorbierte Konzentration des Spurenstoffes [ $\mu\text{g/L}$ ],  $c_w$  ist die gelöste Konzentration (im Überstandswasser bzw. im Klarwasserablauf der Nachklärung) und  $c_t$  ist die gesamte Konzentration ( $c_t = c_w + c_{xs} \times TS$ ) (Margot 2015; Ternes et al. 2004). Somit kann allein mit Kenntnis des TS-Gehaltes und der spezifischen Sorptionskoeffizienten der Anteil der Sorption abgeschätzt werden. Die aus der Literatur bekannten  $k_d$ -Werte beziehen

sich in der Regel auf feste Oberflächen. Bisher liegen diese Sorptionskoeffizienten für die Sorption an Belebtschlamm nur für sehr wenige Spurenstoffe vor (Stevens-Garmon et al. 2011; Hyland et al. 2012; Berthod et al. 2017; Ternes et al. 2004; Papageorgiou et al. 2016; Wick et al. 2009; Pomiès et al. 2013). Anhang 1 fasst die aus der Literatur bekannten  $k_d$ -Werte für die in diesem Projekt untersuchten Spurenstoffe zusammen. Wie Berthod et al. (2014; 2017) berichten, hängt die tatsächliche Sorptionsrate im Wesentlichen von der Ladung, der Molekülstruktur und von den Eigenschaften des Schlammes ab. Des Weiteren zeigen Berthod et al. (2016), dass für Primär-, Belebt- und Überschussschlamm sowie anaerob stabilisierten Klärschlamm spezifische Sorptionskoeffizienten anzuwenden sind.

Nach Sipma et al. (2010) ist die Sorption am Belebtschlamm für Stoffe mit einem Sorptionskoeffizienten von  $k_d < 500$  L/kg TS vernachlässigbar (weniger als 10 %), wenn die spezifische Schlammproduktion im Mittel  $200 \text{ g/m}^3$  beträgt. Da Arzneistoffe aufgrund der häufig polaren funktionellen Gruppe hydrophil sind und nicht sehr gut sorbieren, sind auch die Eliminationsraten in der mechanischen Vorreinigung (Rechengut, Sand, Primärschlamm) gering (Göbel et al. 2007).

Durch Sorptions-Isotherme wird die Abhängigkeit der Beladung eines Adsorbens (hier z.B. Belebtschlamm) von der in der flüssigen Phase gelösten Konzentration (Adsorbat) beschrieben. Dieses ist vor allem dann von Interesse, wenn von einem nicht linearen Zusammenhang ausgegangen werden muss. Die am häufigsten verwendeten Isothermen in der Abwasserbehandlung sind die Freundlich- und Langmuir-Isothermen. Die Freundlich-Isotherme ist das empirische Modell zur Beschreibung von Umweltsorptionsprozessen und zur heterogenen Oberflächenadsorption. Nach dem Freundlich-Modell steht die sorbierte Konzentration  $c_s$  in Beziehung zur löslichen Konzentration  $c_w$  [mg/L]. Somit ist die Restkonzentration (Adsorbat) in der flüssigen Phase basierend auf der folgenden Gleichung im Sorptionsgleichgewicht:

$$c_s = k_f * c_w^{1/n} \quad (7)$$

Hierbei ist  $k_f$  der Freundlich-Sorptionskoeffizient und  $1/n$  (dimensionslos) die Freundlich-Affinitätskonstante. Sie ist ein Maß für die Intensität der Adsorption. Je höher der  $1/n$ -Wert, desto günstiger ist die Adsorption. Je höher der  $k_f$ -Wert, desto höher ist die Adsorptionskapazität und damit die Eliminationsrate. Da die Sorption von Spurenstoffen von deren physikalisch-chemischen Eigenschaften abhängt, wird erwartet, dass stärker hydrophobe Verbindungen eine höhere Adsorptionskapazität und damit eine höhere Entfernungseffizienz aufweisen. Wenn die Sorptionsisotherme linear ist ( $n = 1$ ), ist die Sorption unabhängig von der Konzentration und kann durch den Sorptionskoeffizienten  $k_d$  bestimmt werden (vgl. Gleichung 5)

Bei niedrigen Schadstoffkonzentrationen (z. B.  $< 1 \text{ g/L}$ ) relativ zur Schlammmenge ( $> 100 \text{ mg TS/L}$ ) wird häufig das lineare Modell berücksichtigt, da die mögliche Sättigung des Schlammes vernachlässigt werden kann. Dieses Modell ist jedoch nicht in allen Fällen geeignet, insbesondere für höhere Schadstoffkonzentrationen. In diesem Fall wurde gezeigt, dass das Freundlich-Modell genauer ist, da es die Sättigung des Adsorbens berücksichtigt.

### 2.3 Verflüchtigung/ Strippung

Die Diffusion einer Substanz aus dem Wasser in die Luft wird als Verflüchtigung (auch: Flüchtigkeit oder Volatilität) bezeichnet. Die Verflüchtigung während der Belüftung (z. B. in der Nitrifikationszone eines Belebungsbeckens) wird auch als Strippung bezeichnet. Die Verteilung eines Stoffes zwischen Gas- und Wasserphase kann mithilfe der Henry-Konstanten  $k_H$  [ $\text{Pa} \times \text{m}^3 / \text{mol}$ ] abgeschätzt werden. Pomiès et al. (2013) nennen außerdem einige Betriebsbedingungen (Belüftung, Umwälzung, Temperatur und atmosphärischer Druck) als weitere Randbedingungen, die einen Einfluss auf die Verflüchtigung haben können.

Der Luft-Wasser-Verteilungskoeffizient  $k_{aw}$  ist eine dimensionslose Darstellung der Henry-Konstante. Sie ist definiert als:

$$k_{aw} = \frac{c_L}{c_w} = \frac{k_H}{R \times T} = \frac{M \times p_p}{c_w \times R \times T} \quad (7)$$

mit:  $c_w$  = Anfangskonzentration in der gelösten Phase [ $\mu\text{g} / \text{L}$ ]  
 $c_L$  = Konzentration in der Luft [ $\mu\text{g} / \text{L}$ ]  
 $R$  =  $8,314 \times 10^3$  [(L  $\times$  Pa) / (mol  $\times$  K)] – Gaskonstante  
 $T$  = Temperatur [K]  
 $M$  = molare Masse des Spurenstoffes [ $\mu\text{g} / \text{mol}$ ]  
 $p_p$  = Partialdruck des Spurenstoffes [Pa]

Joss et al. (2006) geben einen Zusammenhang zwischen dem mittels Strippung während der Belüftung entfernten Anteils ( $y_{stripp}$ ) und der spezifischen Belüftungsrate  $q_{Luft}$  [ $\text{m}^3$  Luft /  $\text{m}^3$  Abwasser] an:

$$y_{stripp} = 1 - e^{(-k_{aw} \times q_{Luft})} \quad (8)$$

Die spezifische Belüftungsrate  $q_{Luft}$  gibt dabei die benötigte Luftmenge pro Abwassermenge an. In konventionellen Belebtschlammanlagen beträgt dieser Wert in der Regel  $q_{Luft} = 5$  bis  $15 \text{ m}^3$  Luft pro  $\text{m}^3$  Abwasser.

Nach Margot (2015, S. 26) kann die Strippung bei mittlerem Luftvolumenstrom und Temperaturen von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  wie folgt abgeschätzt werden:

- **Vernachlässigbare Strippung (< 5 %)** – trifft für hydrophile Stoffe wie Arzneistoffe zu.  
für  $k_{aw} < 3 \times 10^{-3}$  oder  $k_H < 8$  [Pa  $\times$   $\text{m}^3$  / mol]
- **Geringe oder moderate Strippung (5 bis 50 %)** – trifft u.a. für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) zu.  
für  $3 \times 10^{-3} < k_{aw} < 5 \times 10^{-2}$  oder  $8 < k_H < 20$  [Pa  $\times$   $\text{m}^3$  / mol]
- **Hohe Strippung (> 50 %)** – hierzu zählen flüchtige organische Verbindungen, die in der Regel hydrophob sind. Dies sind z.B. die Stoffgruppen der Alkane, Terpene, Ester oder Aldehyde. Im Projekt der vorliegenden Studie wurden diese Stoffgruppen nicht berücksichtigt (vgl. Abs. 3.4).  
für  $k_{aw} > 5 \times 10^{-2}$  oder  $k_H > 20$  [Pa  $\times$   $\text{m}^3$  / mol]

Nach Margot (2015), kann die Eliminierung durch Verflüchtigung für die Liste der Spurenstoffe des aktuellen Projektes vernachlässigt werden, da überwiegend hydrophile Stoffe untersucht werden. Bei der Abwasserreinigung ist die Verflüchtigung in erster Linie für leicht flüchtige Stoffe (z. B. Benzol) relevant. Auch Beier (2010) geht davon aus, dass die Strippung gut wasserlöslicher Arzneistoffe, die nicht flüchtig sind ( $k_H < 1 \text{ Pa} \times \text{m}^3 / \text{mol}$ ), eine untergeordnete Rolle spielt. Allein für einige PAKs kann die Strippung einen nennenswerten Beitrag zur Elimination leisten (Byrns 2001; Lee et al. 1998).

## 2.4 Abiotischer Abbau

Während der (biologischen) Abwasserreinigung können Spurenstoffe auch mittels abiotischer Prozesse eliminiert werden. Hierzu zählen die Photolyse und die Hydrolyse sowie die Reaktion mit anderen Stoffen. Diese Transformationsprozesse werden z. T. auch in den technischen Verfahren der sogenannten Vierten Reinigungsstufe (vgl. Abs. 2.2.6) genutzt.

### 2.4.1 Photolyse

Eine direkte Photolyse tritt auf, wenn ein Photon von einer Verbindung aufgenommen wird und eine neue Verbindung gebildet wird (Margot 2015). Daneben kann eine indirekte Photolyse erfolgen, bei der reaktive Sauerstoffspezies (infolge der Sonneneinstrahlung) entstehen können (Wang und Lin 2014). Die mit dem Spurenstoff reagierenden reaktiven Sauerstoffspezies (z.B. Ozon  $O_3$  oder Wasserstoffperoxid  $H_2O_2$ , das Hydroxyl-Radikal  $OH\cdot$  oder andere Radikale) können somit eine Rolle bei der technischen Elimination von Spurenstoffen spielen (z. B. Ozonung). Die direkte Photolyse kommt hingegen bei der UV-Behandlung von Abwasser zum Tragen, obwohl diese Behandlungsstufe in erster Linie der Reduzierung einer möglichen Keimbelastung dienen soll. Bei konventionellen Belebungsanlagen spielt die Photolyse infolge der Sonnenstrahlung aufgrund des geringen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses und der hohen Trübung eine geringe Rolle. Allenfalls in der Nachklärung oder in Schönungsteichen könnte daher eine signifikante direkte Photolyse erfolgen.

Ryan et al. (2011) haben eine Eliminierung der Antibiotika Sulfamethoxazol und Trimethoprim im Klarwasser des Kläranlagenablaufs festgestellt, die sie auf eine indirekte Photolyse zurückführen. Sie schlagen daher Schönungsteiche oder Pflanzenkläranlagen für eine weitergehende Reduzierung solcher Substanzen vor. Eine gute (bei Diclofenac) und mäßige (bei Sulfamethoxazol) Elimination infolge Photolyse wurde von Poirier-Larabie et al. (2016) festgestellt. Ähnliches haben Verlicchi und Zambello (2014) für weitere Arzneistoffe festgestellt. Andererseits berücksichtigen viele Studien zur Eliminationsleistung der Photolyse keine Arzneistoffe (Urase und Kikuta 2005; Plósz et al. 2010) oder Schwermetalle (Wang et al. 2003), da erwartet wird, dass keine nennenswerte Eliminationsrate vorliegt.

### 2.4.2 Hydrolyse

Bei der Hydrolyse wird eine chemische Verbindung aufgespalten, bei der ein Atom oder eine Atomgruppe durch ein Wasser- oder Hydroxid-Ion ersetzt wird. In der aquatischen Umwelt kann die Hydrolyse für den Abbau einiger organischer Verbindungen eine relevante Rolle spielen. Generell hängt die Hydrolyserate von der Temperatur und dem pH-Wert ab. Stoffe mit einer sehr kurzen Hydrolyse-Halbwertszeit werden bereits in der Kanalisation umgesetzt. Im Vergleich zur Sorption oder zu dem biologischen Abbau nimmt jedoch die Hydrolyse für Stoffe im kommunalen Abwasser eine untergeordnete Stellung ein (Schwarzenbach et al. 2017).

Durch Hydrolyse abgebaut werden können u. a. Ester, Amide sowie verschiedene Antibiotika (Sulfonamide, Tetracycline, Makrolide und  $\beta$ -Lactame mit einer Hydrolyse-Halbwertszeit von etwa zwei Tagen, Ying et al. 2013). Aus der Liste der in der vorliegenden Studie berücksichtigten Spurenstoffe (vgl. Abs. 3.4) könnten daher das Sulfonamid Sulfamethoxazol und das Tetracyclin Oxytetracyclin durch Hydrolyse eliminiert werden.

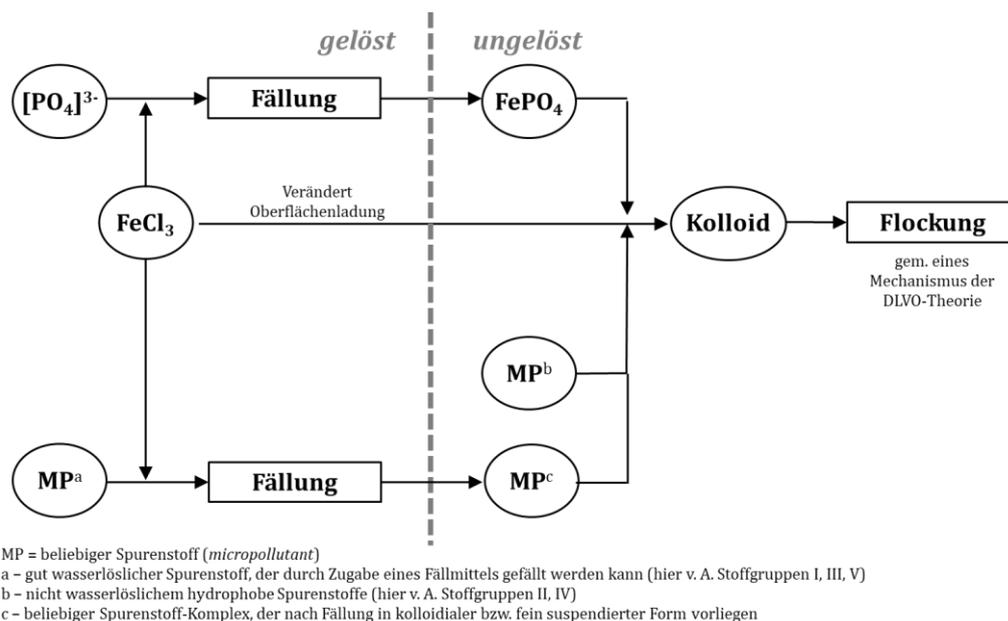
## 2.5 Fällung und Flockung

Die chemische Fällung gilt als bewährte Technologie zur Entfernung verschiedener Arten von Schadstoffen, einschließlich organischer und anorganischer Schadstoffe, aus dem Abwasser (Lefebvre et al. 2010). Im Allgemeinen ist die Fällung ein Verfahren, bei dem Verunreinigungen, die entweder gelöst oder suspendiert sind, als fester Niederschlag ausfallen und dann filtriert, zentrifugiert oder auf andere physikalische Weise vom flüssigen Teil getrennt werden kann. Diese Kombination physikalisch-chemischer Prozesse kommt in der Abwasserreinigung in erster Linie für die Phosphat-Elimination zum Einsatz.

Unter der Fällung wird der chemische Prozess des Übergangs von der gelösten in die ungelöste Phase bezeichnet. Gefällte Komplexe können dann nach einer Flockungsphase mittels Sedimentation (meist als Überschussschlamm bei der Simultanfällung) oder durch Filtration (z.B. Flockungsfiltration bei der Nachfällung) aus dem Abwasserstrom entfernt werden. Es ist bekannt, dass bei der Phosphat-Fällung stets auch andere Abwasserinhaltsstoffe gefällt werden (Co-Fällung). Aus diesem Grund erfolgt die Fällmittelgabe zur Reduzierung der Phosphat-Konzentration in der Regel stöchiometrisch überdosiert. Prinzipiell ist diese Überdosierung der Fällmittel bei der Nachfällung geringer als bei einer Vor- oder Simultanfällung, da weniger gelöste Verbindungen mitgefällt werden.

Die chemische Fällung wird durch Zugabe verschiedener Arten von Fällmitteln erreicht. Hierzu zählen z. B. anorganische Salze, Polymere oder organische Polyelektrolyte. Die in letzter Zeit am häufigsten verwendeten Fällungsmittel sind anorganische Salze (meist Eisen- oder Aluminiumsalze). Nach Zugabe dieser Salze zum Abwasser werden sie hydrolysiert und bilden mehrere lösliche Komplexe mit spezifischen Oberflächenladungen, die mit weiteren Wasserinhaltsstoffen reagieren können. Die daraus resultierenden Kolloide (fein suspendierte Stoffe) müssen im Folgenden durch Flockungsprozesse zu größeren Aggregaten zusammenwachsen, damit sie physikalisch abtrennbar sind.

Die Zugabe von Fällmitteln zielt in erster Linie auf die Fällung von Phosphat. Zugleich können gut wasserlösliche Spurenstoffe, die nicht zur Sorption neigen (hier Gruppen I, III, V – vgl. Tabelle 2) ebenfalls gefällt werden. Neben der direkten Fällung kann die Zugabe des Fällmittels aber auch einen Einfluss auf die anschließende Flockung haben, wenn die Oberflächenladung der Kolloide verändert wird (Abbildung 2). Zur Flockung neigen in erster Linie hydrophobe, unlösliche Stoffe, die zur Sorption neigen (hier Gruppen II, IV).



**Abbildung 2: Mechanismen bei der Fällung und Flockung, die zum Rückhalt von Spurenstoffen beitragen können.**

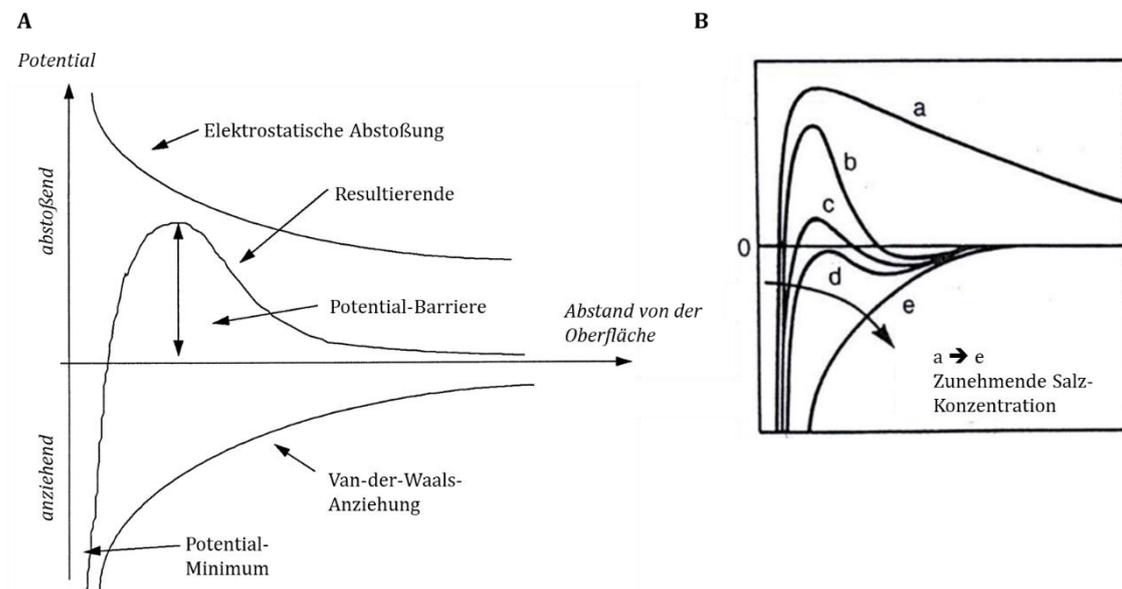
Nach Zugabe des Fällmittels und dem darauffolgenden Phasenübergang (gelöst-ungelöst) befinden sich die Wasserinhaltsstoffe (und damit auch ein Teil der zuvor gelösten Spurenstoffe) nunmehr in einer kolloidalen oder fein suspendierten Form. Entscheidend für das Verhalten einer Suspension sind die elektrostatischen Wechselwirkungen an der Grenzschicht.

Anziehende Kräfte zwischen mehreren Kolloiden werden durch die van-der-Waals-Kräfte beschrieben. Bei Teilchen gleicher Oberflächenladung lässt sich eine abstoßende Kraft feststellen.

Gemäß der DLVO-Theorie (benannt nach deren Begründern Derjaguin, Landau, Verwey und Overbeek aus den 1940er Jahren) werden diese abstoßenden und anziehenden Potentiale in einem Gesamtpotential vereint. Damit ermöglicht es Aussagen über die Stabilität einer Suspension bzw. das Verhalten bestimmter Kolloide. Die Theorie ist mithin dazu geeignet, das Verhalten einzelner Spurenstoffe während der Fällung / Flockung zu erklären.

Zur Bildung vom Kolloiden, die sich schließlich physikalisch (etwa mittels Filtration oder Sedimentation) abtrennen lassen, ist die Überwindung einer Potential-Barriere in der resultierenden Potentialkurve (Abbildung 3A) notwendig. Dieses Energiepotential kann beispielweise durch den Eintrag kinetischer Energie überwunden werden. Aus diesem Grund wird gemeinhin das Einbringen von Fällmitteln in einem möglichst turbulenten Bereich empfohlen.

Durch die Zugaben von Fällmitteln (meist Metallsalze) können die resultierenden Potentialkurven verschoben werden (Abbildung 3B), so dass im Idealfall eine nur geringe oder keine Potentialbarriere überwunden werden muss. Die Resultierende Potentialkurve (a) gibt einen Zustand an, in dem sich die Oberflächen der einzelnen Kolloide stark abstoßen. Die Suspension bleibt stabil. Mit zunehmender Salzkonzentration nimmt die Potentialbarriere ab und die Kolloide koaleszieren (wachsen zusammen).



**Abbildung 3: Darstellung der Potentialkurven nach der DLVO-Theorie.**

A: Ableitung der resultierenden DLVO-Potentialkurve.

B: Verschiebung der resultierenden Potentialkurven durch Zugabe von Salz. Verändert und übersetzt nach: Thomas et al. 1999.

In der Flockungsphase werden suspendierte Stoffe über verschiedene Prozesse aggregiert und abgetrennt. Hierzu werden folgende Entstabilisierungsmechanismen gezählt (vgl. hierzu Kraut und Bondareva 2000, S. 14–16; Jarvis et al. 2004; Matilainen et al. 2010):

**Kompression der elektrischen Doppelschicht:** Durch die Zugabe von entgegengesetzt geladener Ionen (Gegenionen) wird die Verringerung der elektrostatischen Abstoßungskräfte und dadurch eine Kompression der diffusen Doppelschicht ermöglicht. Mit zunehmender Konzentration der Gegenionen (z.B. inerte Ionen:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) wird die Reichweite der elektrostatischen Abstoßung geringer, die van-der Waals Kräfte nehmen relativ zu und die Potential-Barriere (vgl. Abbildung 3) kann überwunden werden.

**Reduktion des Oberflächenpotentials (Adsorption):** Die Entstabilisierung der Suspension wird durch die Adsorption von geladenen Spezies oder durch eine chemische Reaktion an der

Partikeloberfläche erreicht. Diese Form der Koagulation wird vor allem durch die stark positiv geladenen Hydroxokomplexe der mehrwertigen Metallionen (Fe, Al) erreicht. Infolge eines Umladungseffektes durch Überdosierung ist eine Restabilisierung möglich. Hierbei wird die Stoffladung durch Aufnahme positiv geladener Partikel über den Nullpunkt (isoelektrischer Punkt) in den positiven Bereich verschoben.

**Bildung molekularer Brücken / Komplexierung:** Dieser Mechanismus kommt bei der spezifischen Adsorption von Flockungs-(hilfs-)mitteln auf mehreren suspendierten Partikeln zum Tragen. Hierfür müssen die Flockungsmittel eine ausreichende Molekülgröße aufweisen, so dass die elektrostatische Abstoßung (vgl. Abbildung 3) durch ausreichende Distanz überwunden werden kann. Es kommen daher langkettige Polymere als Flockungshilfsmittel zum Einsatz.

**Mitfällung:** Durch den Einschluss von suspendierten Partikeln in die Fällprodukte wird eine Mitfällung erreicht. Die bei mittleren pH-Werten ausfallenden Eisen- bzw. Aluminiumhydroxide schließen andere disperse Feststoffe in die entstehenden Flocken ein. Dieser Mechanismus erlaubt den Rückhalt aller Arten von Kolloiden. Eine Restabilisierung durch Überdosierung kann nicht auftreten.

**Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften üblicher Fällmittel.**  
(vereinfacht nach Matilainen et al. 2010, dort mit weiteren Nachweisen)

Art des Fällmittels	Wirkungsweise/ Eigenschaften	Vorteile	Nachteile
Aluminiumsalze	Dreiwertige Aluminium-Ionen werden in das Wasser abgegeben.  Diese werden hydrolysiert und bilden gelöste Komplexe, die eine hohe positive Ladung aufweisen.  Der höchste Wirkungsgrad wird bei einem pH-Wert von 5,0-6,5 erreicht.	Stabiles, gut lösliches und verarbeitbares Fällmittel  Ermöglicht bessere Eliminationsleistungen als Eisensalze bei geringen Dosierungen  Besserer Rückhalt von natürlichen organischen Verbindungen als Eisensalze.	Bisweilen hohe Restkonzentrationen im Überstandswasser  Hoher Verbrauch der Bassenkapazität,  Sulfate und Chloride im behandelten Abwasser verstärken Korrosion.
Eisensalze	Eisensalze hydrolysieren nach Zugabe zu Wasser und bildet ungelöste Komplexe, die eine hohe positive Ladung aufweisen.  Der höchste Wirkungsgrad wird bei einem pH-Wert von 4,5-6,0 erreicht	Bessere Eliminationsleistung als Aluminiumsalze bei mittleren bis hohen Konzentrationen.  Wenig problematisch bei Änderungen der Temperatur	Geringe Pufferkapazität erfordert ggf. Gabe von Puffern zur Vermeidung von Korrosion.
Polymere (PACl)	Gebildet aus teilweise neutralisierten Aluminium-Chlorid.	Weniger abhängig von Temperatur und pH-Wert als Aluminiumsalze.  Häufig besserer Rückhalt gelöster organischer Verbindungen.  Geringere Schlammproduktion.  Geringere Al-Restkonzentration im Überstandswasser.	Weniger effizient für gelöste Stoffe mit hoher Molarmasse

Die Bildung von abtrennbaren Flocken während der Flockungsphase hängt somit von diesen vier Mechanismen ab, die prinzipiell parallel ablaufen. Aufgrund der unterschiedlichen Molekülstruktur einzelner Spurenstoffe, sind die einzelnen Mechanismen für jeden Spurenstoff unterschiedlich dominant oder vernachlässigbar (Matilainen et al. 2010). Als einer der wichtigsten Einflussgrößen auf diese Mechanismen wurde der pH-Wert festgestellt (Sharp et al. 2006).

Die Reduktion des Oberflächenpotentials mit anschließender Adsorption (gelöster) Wasserinhaltsstoffe an die während der Fällungsphase gebildeten Kolloide ist der dominierende Mechanismus bei der konventionellen Phosphat-Fällung. Hierbei hängt es im Wesentlichen von der Sorptionsneigung (u.a. Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizient) der einzelnen Stoffe ab (vgl. Abs. 2.2), inwieweit sie über diesen Prozess aus dem Wasser entfernt werden können (Lefebvre et al. 2010).

Unter Laborbedingungen konnte von Carballa et al. (2005) beispielsweise für Diclofenac während der Fällung / Flockung eine Eliminationsrate von mehr als 65 % bei einer Dosierung von je 50 mg/L Eisen(III)-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) und Aluminiumsulfat ( $\text{AlSO}_4$ ) festgestellt werden.

Die verschiedenen Arten von Fällmitteln, die üblicherweise in der Abwasserreinigung zur Phosphat-Elimination zum Einsatz kommen, sind mit ihren Eigenschaften, Vor- und Nachteilen in Tabelle 1 aufgeführt. Die Wirksamkeit der Ausfällung hängt von mehreren Faktoren ab: Art und Dosierung der Fällmittel, Mischbedingungen, pH-Wert, Temperatur, Partikel- und Schadstoffeigenschaften (Größe, Ladung und Hydrophobie) sowie dem Vorhandensein zweiwertiger Kationen und der Konzentration der destabilisierenden Anionen (Bicarbonat, Chloride und Sulfate). Weitere Informationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

## 2.6 Einteilung in Stoffgruppen

Die Auswertung beruht in weiten Teilen auf den im Abschlussbericht der ersten Projektphase definierten Stoffgruppen (hier als Tabelle 2 unverändert wiederholt), die sich als zweckmäßig für eine Beurteilung des möglichen Rückhaltes bestimmter Spurenstoffe bewährt haben. Die Gruppeneinteilung wurde auf Basis der aktuellen Untersuchungsergebnisse überprüft (vgl. Abs. 5.1).

Der Rückhalt von Spurenstoffen ist sehr divers und hängt von spezifischen Stoffeigenschaften ab. Prinzipiell sind der biologische Abbau und die Sorption die relevanten Mechanismen in der kommunalen Kläranlage (vgl. Abs. 2.1 und 2.2). Beide Mechanismen finden parallel statt und beeinflussen sich gegenseitig. Die untersuchten Spurenstoffe lassen sich daher in die in Tabelle 2 zusammengefassten sechs Gruppen einteilen.

Stoffe der Gruppen II, IV, V und VI werden größtenteils über Sorption oder biologischen Abbau zurückgehalten (Eliminationsrate meist > 90 %). Die Gruppe III schließt Stoffe ein, die häufig nur zum Teil aus dem Wasserpfad entfernt werden können. Besonders problematisch sind die Stoffe der Gruppe I, die weder durch Sorption noch durch Biodegradation zurückgehalten werden. Für Stoffe dieser Gruppe ist eine weitere Verfahrensstufe zusätzlich zur konventionellen Belebtschlammbehandlung notwendig, wenn sie zurückgehalten werden sollen. Schwermetalle sind aufgrund ihrer hohen Sorptionsneigung der Gruppe II zuzuordnen. Auch gehört dieser Gruppe der Großteil der Substanzen der  $\text{PAK}_{16}$  an.

Arzneistoffe sind aufgrund der erforderlichen Stoffeigenschaften i. d. R. hydrophil bzw. nicht sorptionsaffin und sie gehören daher ausschließlich den Stoffgruppen I, III und V an. Daher hängt der Rückhalt der (hier berücksichtigten) Arzneistoffe ausschließlich von deren biologischer Abbaubarkeit ab. Die Unterschiede der beiden Stoffgruppen III und V, die einen mäßigen oder guten biologischen Abbau wiedergeben, äußern sich in unterschiedlichen Gesamt-Eliminationsraten. So werden Wirkstoffe der Stoffgruppe V nahezu vollständig biologisch abgebaut

(Medianwert der rechnerischen Eliminationsrate bis zu > 99 %). Die mäßig abbaubaren Substanzen der Stoffgruppen III unterliegen einer mittleren Eliminationsrate von 30 bis zu 94 %.

Bezüglich des Einflusses von Fällmitteln wäre zu beachten, dass hydrophile Stoffe durch Fällung chemisch gefällt werden könnten. Zur Sorption neigende Stoffe könnten daraufhin theoretisch in der Flockung affektiert werden. Eine Fällung (Phasenübergang von der gelösten in die ungelöste Phase) von Spurenstoffen kann daher prinzipiell nur bei hydrophilen, gelösten Substanzen (Stoffgruppen I, III, V) erfolgen. Die im Anschluss der Fällung erfolgende Flockung (auch: Koagulation) ist hingegen in erster Linie für sorptionsaffine Stoffe der Stoffgruppen II und IV relevant. Für einen effektiven Rückhalt von Spurenstoffen müsste daher zunächst ein hydrophiler Stoff gefällt werden. Die suspendierten Fällungsprodukte müssten dann zur Sorption neigen, um mittels physikalischer Verfahren abgetrennt werden zu können.

**Tabelle 2: Gruppeneinteilung der untersuchten Spurenstoffe nach Eliminationsmechanismen in Belebtschlammanlagen.**

	Sorption vernachlässigbar ( $k_{ad} < 500 \text{ L/kg TS}$ )	Sorption relevant ( $k_{ad} > 500 \text{ L/kg TS}$ )
<b>nicht relevanter biolog. Abbau</b> $k_{bio} < 0,1$ L / (g TS × d)	<b>I</b> Carbamazepin Iopamidol Diuron Imidacloprid Isoproturon Terbutryn	<b>II</b> Blei Cadmium Nickel Quecksilber Triclosan Benzo[a]anthracen Benzo[a]pyren Benzo[b]fluoranthen Benzo[ghi]perylen Benzo[k]fluor. Chrysen Dibenzo[ah]ant. Flouranthen Indeno[1,2,3-cd]p. Pyren PFOS
<b>mäßiger biologischer Abbau</b> $0,1 < k_{bio} < 10$ L / (g TS × d)	<b>III</b> Ciprofloxacin Diclofenac Gabapentin Metoprolol Sulfameth. Trimethoprim Glyphosat Naphthalin Phenanthren Bisphenol A Benzotriazol	<b>IV</b> Fluoren Acenaphthen Acenaphthylen Anthracen <sup>1</sup>
<b>guter biologischer Abbau</b> $k_{bio} > 10,0$ L / (g TS × d)	<b>V</b> Coffein Ibuprofen Metformin Acesulfam-K	<b>VI</b> praktisch nicht nachweisbar <sup>1</sup>
Farbliche Codierung: <b>Schwermetalle</b> , <b>Arzneistoffe</b> , <b>Pflanzenschutzmittel</b> , <b>PAK</b> , <b>Sonstige</b> . Für die in dieser Studie berücksichtigten Stoffe Oxytetracyclin, Acclonifen, Bifenox, Cybutryn, Cypermethrin, Dichlorvos, Dicolol, Quinoxifen und Terbutylazin ist keine Einordnung möglich, da keine Stoffkennwerte vorliegen und sie nicht bzw. in nicht ausreichendem Maß nachgewiesen werden konnten. <sup>1</sup> Der Nachweis von Sorption erfolgt i. d. R. über den im Überschussschlamm gebundenen Anteil der Zulaufcharge. Wird ein Stoff vollständig biologisch abgebaut, kann er nicht mehr im Schlamm gebunden sein. Eine mögliche Sorption wird somit unterbunden.		

## 3 Methoden

Im Rahmen des hier beschriebenen Projektes wurden Laborversuche mit dem Ziel durchgeführt, den Rückhalt von Spurenstoffen durch die Zugabe von Fällmitteln zu untersuchen (Abs. 2.5). Der spezifische Einfluss der Gabe von Co-Substraten zur Unterstützung der Denitrifikation auf die analytische Genauigkeit wurde separat untersucht. Darüber hinaus wurden in der Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK) Reinfeld bzw. einer Modellkläranlage Versuchsreihen gefahren, die zur Bestimmung von Kenngrößen der Sorption (Abs. 2.2) bzw. des biologischen Abbaus (Abs. 2.1) dienen. Die Versuchsreihen und die dabei verwendeten Materialien und Methoden werden im Folgenden beschrieben.

### 3.1 Laborversuche

Zur Bestimmung des spezifischen Einflusses von Fällmitteln und Co-Substraten auf den Rückhalt von Spurenstoffen bzw. auf die analytische Genauigkeit wurden Standversuche durchgeführt. Die Ergebnisse konnten mit denen aus dem vorherigen Forschungsvorhaben abgeglichen werden und dienten somit der Verifizierung der erhobenen Daten. Hierfür wurden zwei Versuchsreihen vorgesehen.

#### 3.1.1 Versuchsreihe 1: Fällmittel

Zur Ermittlung des spezifischen Einflusses der Fällung auf den Rückhalt von Spurenstoffen wurde folgender Versuchsablauf umgesetzt:

- a. Fünf Standzylinder (1 Liter) wurden parallel mit Belebtschlamm (entsprechend einer Simultanfällung) oder Klarwasser (entsprechend einer Nachfällung) gefüllt.
- b. In das Abwasser wurden übliche Fällmittel in unterschiedlichen Dosierungen / Konzentrationen gegeben (ein Standzylinder bleibt unbehandelt als Nulltest).
- c. Es erfolgte die Untersuchung von insgesamt vier Fällmitteln (sowohl eisen- als auch aluminiumbasiert) in separaten Versuchsreihen.
- d. Im Überstandswasser (entspricht dem aus der Nachklärung abgezogenen Klarwasser) wurden nach einer initialen Reaktionsphase und einer finalen Sedimentationsphase die Spurenstoffe analysiert.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen zur Bestimmung des genauen Versuchsablaufs und zur Fällmitteldosierung konnte die Versuchsreihe 1 im November 2019 abgeschlossen werden. Es wurden folgende, üblicherweise auf kommunalen Kläranlagen eingesetzten Fällmittel berücksichtigt:

- (1) Eisen(III)-chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) – Fabrikat: Ferrifloc-C, Hersteller: Kronos ecochem
- (2) Eisenchloridsulfat ( $\text{FeClSO}_4$ ) – Fabrikat: Ferrifloc, Hersteller: Kronos ecochem
- (3) Aluminiumchlorid ( $\text{AlCl}_3$ ) – Fabrikat: AFC-5025b, Hersteller: PWT
- (4) Polyaluminiumchlorid (PACl) – Fabrikat: PWT-Flock PAC-90, Hersteller: PWT

Der detaillierte Arbeitsablauf der Versuchsreihen zur Bestimmung des Einflusses der Fällmittelgabe und der Co-Substrate ist in Abbildung 4 wiedergegeben. Nach Zugabe des Fällmittels erfolgt eine 5-minütige Reaktionsphase (Durchmischung) auf die eine 30-minütige Sedimentations- / Ruhephase folgte. Zuvor wurde bei den Belebtschlamm-Proben eine Teilprobe zur Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes (TS) und des Schlammvolumens (SV) entnommen,

um den spezifischen Einfluss der Fällmittelgabe auf beide Parameter zu bestimmen. Das Überstandswasser wurde schließlich mit einer Vakuumpumpe abgezogen und nach einer 5-minütigen Homogenisierung für die Spurenstoff-Analytik und die Bestimmung der Begleitparameter vorbereitet.

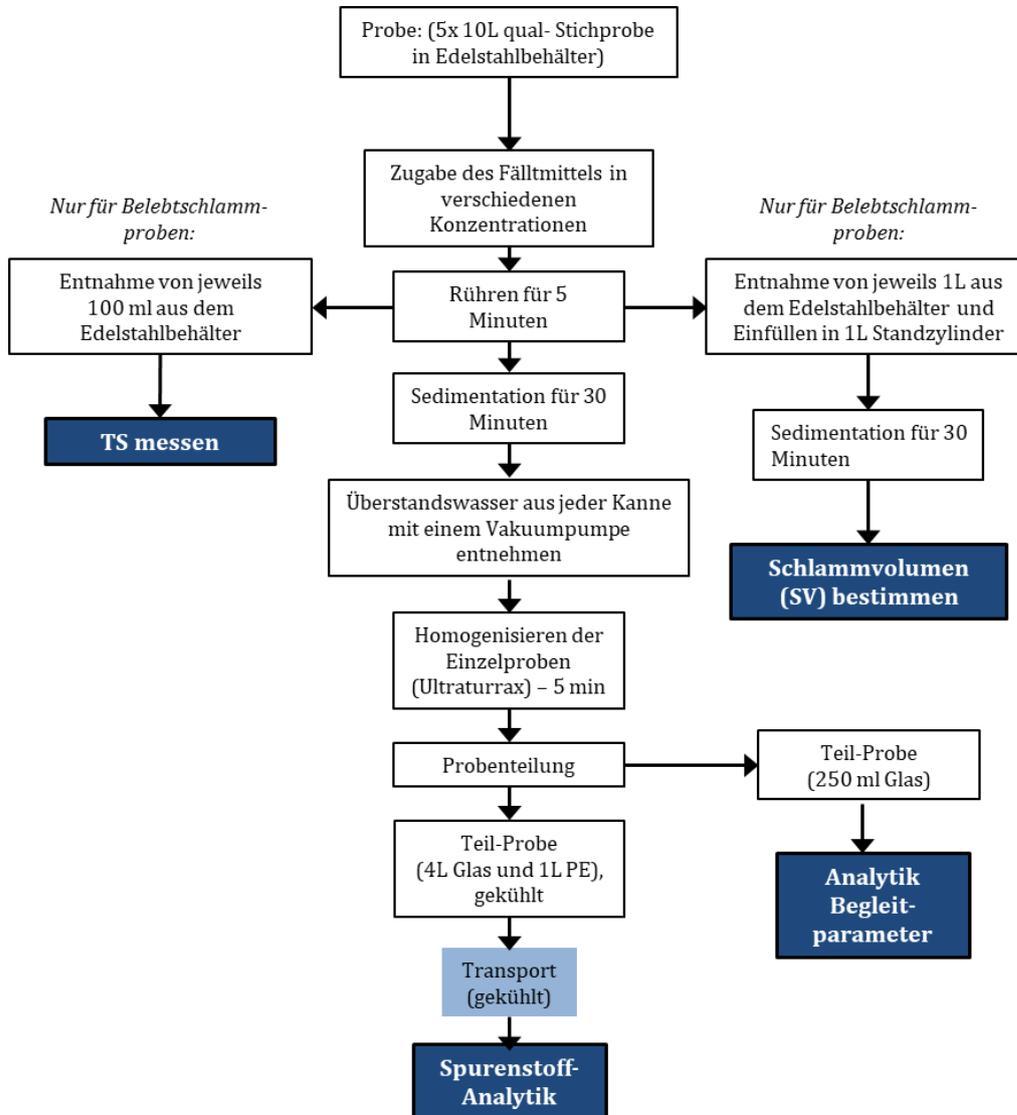


Abbildung 4: Arbeitsablauf der Versuchsreihen zur Bestimmung des Einflusses der Fällmittelgabe und der Co-Substrate.

Die Bezeichnung der Proben erfolgte nach folgendem Schema:

FM – Art des Fällmittels – Dosierung – Datum (Jahr, Monat, Tag)

z.B. FM-2-3-191024 bedeutet; Fällmittel Eisen(III)-chlorid, einfache Fällmitteldosierung, Probe vom 24. Okt. 2019

Die Zuordnung der Fällmittel erfolgt anhand obiger Aufstellung. Für die Dosierung wurde zunächst ein Nulltest (ohne Fällmittel,  $\beta = 0$ ) verwendet. Die erste Fällmittelgabe entspricht der stöchiometrisch bestimmten Gabe zur Fällung von 6 mg P / L (entspricht der mittleren Phosphor-Konzentration der Proben,  $\beta = 1$ ). Die weiteren Proben erhielten eine 2- bis 4-fache Überdosierung ( $\beta = 2$  bis 4).

Belebtschlammproben wurden der Nitrifikationszone der Versuchskläranlage entnommen. Ablaufproben stammen aus dem Klarwasserablauf der Nachklärung. Die Versuchskläranlage wird als vorgeschaltete Denitrifikation ohne Simultanfällung betrieben.

### 3.1.2 Versuchsreihe 2: Co-Substrate

Diese Versuchsreihe war vorgesehen, um mögliche Fehler bei der Detektion von Spurenstoffen, die infolge der Bildung von Wasserstoff-Brückenbindungen nach Zugabe eines Co-Substrats resultieren können, auszuschließen bzw. zu quantifizieren. Es wurde folgender Versuchsablauf umgesetzt:

- a. Fünf Standzylinder (1 Liter) wurden parallel mit Belebtschlamm gefüllt
- b. Dazu werden übliche Co-Substrate (Methanol und Essigsäure) in unterschiedlichen Dosierungen / Konzentrationen gegeben (ein Standzylinder bleibt unbehandelt als Nulltest).
- c. Im Überstandswasser (entspricht dem aus der Nachklärung abgezogenen Klarwasser) wurden nach einer initialen Reaktionsphase und einer finalen Sedimentationsphase die Spurenstoffe analysiert.

Diese Versuchsreihe wurde analog zu den Fällmittel-Untersuchungen (s.o., Versuchsreihe 1 - Abbildung 4) durchgeführt und ebenfalls im November 2019 abgeschlossen.

Zum Einsatz kamen zwei Co-Substrate, die üblicherweise auf kommunalen Kläranlagen bei einer nicht ausreichenden Kohlenstoffquelle zur Unterstützung der Denitrifikation eingesetzt werden:

- (1) Methanol
- (2) Essigsäure

Die Bezeichnung der Proben erfolgte nach folgendem Schema:

CS – Art des Co-Substrats – Dosierung – Datum (Jahr, Monat, Tag)

z.B. CS-1-3-191126 bedeutet; Methanol, einfache Dosierung, Probe vom 26. Nov. 2019

Der Nulltest (hier  $\beta = 0$ ) wurde nicht mit Co-Substrat versehen. Die weiteren Dosierungen beziehen sich auf ein Vielfaches  $\gamma$  des Quotienten aus dem CSB des Co-Substrats ( $c_{\text{CSB,Co-Substrat}}$ ) und der vorhandenen Nitrat-Konzentration ( $s_{\text{NO}_3\text{-N}}$  / Rest-Denitrifikationskapazität):

$$\beta = \gamma ( c_{\text{CSB,Co-Substrat}} / s_{\text{NO}_3\text{-N}} )$$

Bei der Annahme einer zu denitrifizierenden Nitrat-Konzentration von  $s_{\text{NO}_3,\text{DN}} = 3 \text{ mg N/L}$  ergeben sich folgende Dosierungen für beide Co-Substrate:

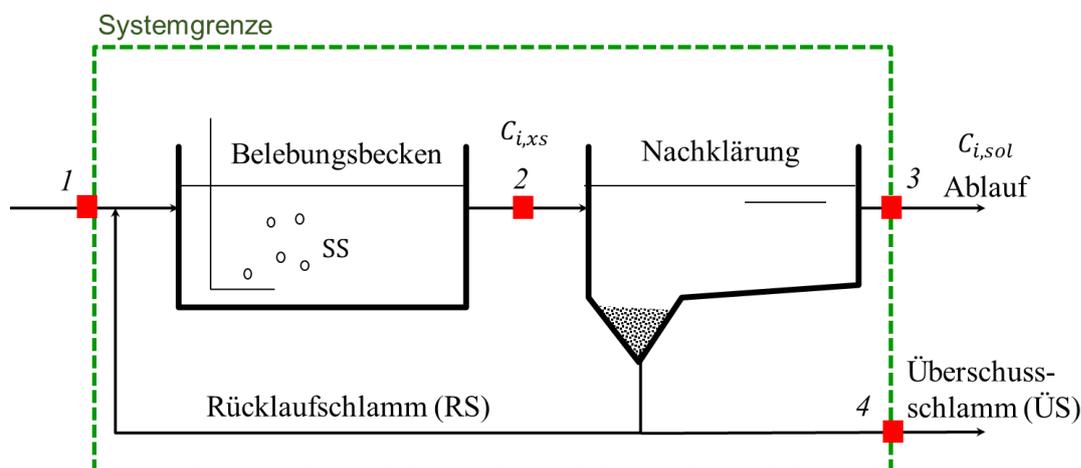
**Tabelle 3: Co-Substrat-Dosierungen [mL/L].**

$\beta$	$\gamma$ [-]	Methanol	Essigsäure
0	0	0	0
1	4	0,303	0,228
2	8	0,606	0,457
3	12	0,910	0,685
4	16	1,213	0,914

### 3.2 Bestimmung der Sorption am Belebtschlamm

Die Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorption am Belebtschlamm wurde in der Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK) Reinfeld durchgeführt. Diese Kläranlage wird nach dem Prinzip der vorgeschalteten Denitrifikation als einstufige Belebungsanlage betrieben und mit kommunalem Abwasser der Stadt Reinfeld, welches mechanisch vorgereinigt wurde (Rechen [5 mm Öffnungsweite], Sandfang ohne Fettfang [etwa 5 min Aufenthaltszeit], Grobentschlammung [etwa 15 min Aufenthaltszeit]), beschickt. Die Kläranlage wird mit einem selbstentwickelten Prozessleitsystem gesteuert und überwacht. Die VAK hat ein Belebungs-volumen von etwa 17 m<sup>3</sup> und eignet sich besonders zur Messung von Sorption. Da hier, anders als auf den meisten kommunalen Kläranlagen, keine störenden Kreislaufströme berücksichtigt werden müssen und alle relevanten Betriebsparameter erfasst werden können, ist ein sehr enges Probenintervall möglich, mit dem der sehr schnell ablaufende Prozess der Sorption untersucht werden kann.

Es wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils drei aufeinanderfolgende 8-Stunden-Mischproben an den vier in Abbildung 5 gezeigten Messstellen genommen. Hierbei kommt zum Tragen, dass zur Feststellung der Sorption veränderliche Zulaufkonzentrationen im Tagesgang erforderlich sind.



**Abbildung 5: Messpunkte auf der VAK zur Bestimmung der Sorption von Spurenstoffen im Belebtschlamm.**

Die Probenahme erfolgte mit Hilfe automatischer Probenehmer (Typ Bühler 3010). Diese wurden so programmiert, dass viertelstündlich eine Teilprobe entnommen wurde (jeweils etwa 230 bis 250 mL). Somit umfasste das Probevolumen am Ende des 8-h-Probeintervalls etwa 7,3 bis 7,6 Liter. Generell erfolgte die Probenahme zeitproportional (nicht durchfluss- oder volumenproportional). Der Überschussschlamm wird nicht kontinuierlich, sondern in Intervallen stündlich aus der Nachklärung abgezogen.

Die Teilproben wurden bereits im Probenehmer auf 4 °C gekühlt. Die Probenahmeschläuche waren zur Vermeidung von Adsorption mit einer Teflon-Beschichtung versehen. Zusätzlich wurden die Schläuche zur Erreichung eines Verteilungsgleichgewichtes zwischen Probenahmematerial und Abwasser vor dem Beginn der Messreihe für zwei Wochen mit Rohabwasser vorbelastet. Die Probenvorbereitung und -teilung erfolgte gem. des in Abbildung 6 dargestellten Arbeitsablaufes. Dieser orientiert sich am Vorgehen der ersten Projektphase.

Die Bezeichnung der Proben erfolgte nach folgendem Schema:

VAK – Probenort – Datum – Uhrzeit

z.B. VAK-1-191010-14: Zulaufprobe vom 10. Okt. 2019, Probenzeitraum 6-14 Uhr

Die Probenorte waren: (1) Zulauf, (2) Belebtschlamm aus Nitrifikationszone der Versuchskläranlage, (3) Überschussschlamm und (4) Klarwasserabzug der Nachklärung.

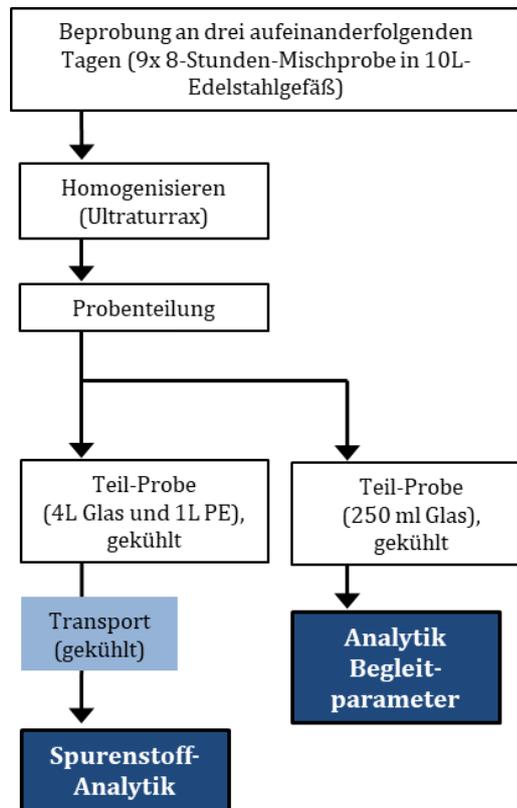


Abbildung 6: Arbeitsablauf zur Bestimmung der Sorption an Belebtschlamm.

Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Stellgrößen der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten (gemittelt über Proben-Zeiträume).

Proben-Zeitraum		$Q_{zu}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{RZ}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{RS}$ [m <sup>3</sup> /h]	$Q_{US}$ [m <sup>3</sup> /d]	
1. Messwoche	08.10.2019	14-22 Uhr	1,07	3,24	1,20	0,54
	08.-09.10.2019	22-06 Uhr	1,00	3,26	1,20	0,51
	09.10.2019	06-14 Uhr	1,06	3,20	1,20	0,48
	09.10.2019	14-22 Uhr	1,08	3,23	1,21	0,31
	09.-10.10.2019	22-06 Uhr	1,02	3,22	1,31	0,48
	10.10.2019	06-14 Uhr	1,00	3,23	1,34	0,48
	10.10.2019	14-22 Uhr	1,04	3,21	1,33	0,54
	10.-11.10.2019	22-06 Uhr	1,00	3,17	1,33	0,45
	11.10.2019	06-14 Uhr	0,99	3,15	1,33	0,48
2. Messwoche	15.10.2019	14-22 Uhr	1,12	3,29	1,82	0,62
	15.-16.10.2019	22-06 Uhr	1,11	3,29	1,69	0,62
	16.10.2019	06-14 Uhr	1,09	3,24	1,68	0,62
	16.10.2019	14-22 Uhr	1,24	3,24	1,68	0,68
	16.-17.10.2019	22-06 Uhr	1,21	3,22	1,68	0,62
	17.10.2019	06-14 Uhr	1,23	3,21	1,68	0,62
	17.10.2019	14-22 Uhr	1,24	3,23	1,68	0,60
	17.-18.10.2019	22-06 Uhr	1,15	3,20	1,68	0,62
	18.10.2019	06-14 Uhr	1,23	3,22	1,68	0,62

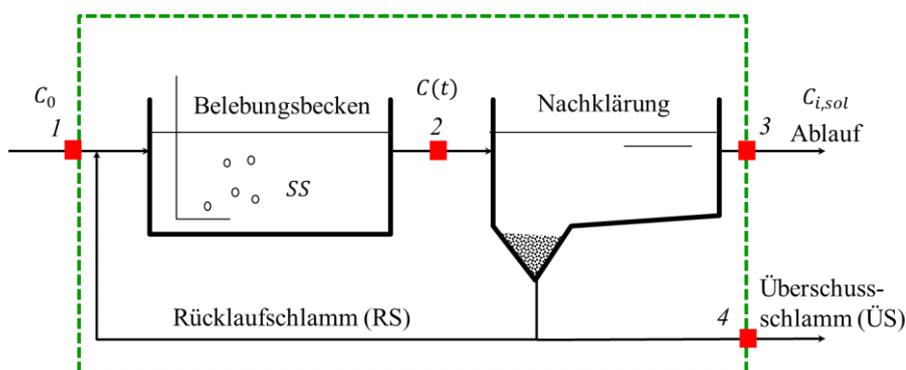
Die in Tabelle 4 angegebene Stellgrößen wurden während des Versuchszeitraums realisiert. Diese führten zu den in Tabelle 5 angegebenen Betriebsparametern.

**Tabelle 5: Zusammenstellung der wichtigsten Betriebsparameter der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten (gemittelt über Versuchsdauer).**

	$TS_{BS}$ [g/l]	$TS_{ÜS}$ [g/l]	$t_{TS}$ [d]	$B_{TS}$ [kg O <sub>2</sub> /kg TS × d]
1. Messwoche	3,822	5,893	17,6	0,173
2. Messwoche	3,588	5,348	14,1	0,178

### 3.3 Bestimmung des biologischen Abbaus

Beide baugleichen Modellkläranlagen (Schema s. Abbildung 7; Belebtschlammvolumen etwa 30 L; Beschickung jeweils etwa 1 L/h) werden parallel mit dem gleichen Abwasserzufluss beschickt. Durch geänderte Stellgrößen (Abzug des Überschussschlamm zur Einstellung des Schlammalters und des TS-Gehalts) kann der spezifische Einfluss unterschiedlicher betrieblicher Parameter auf den biologischen Abbau quantifiziert werden. Weitere Stellgrößen (Sauerstoffkonzentration, Rezirkulations- und Rückführrate) werden konstant gehalten. Die Bestimmung der dynamischen Biodegradationskonstante  $k_{bio,dyn}$  erfolgt nach Gleichung 1b (Abs. 2.1).

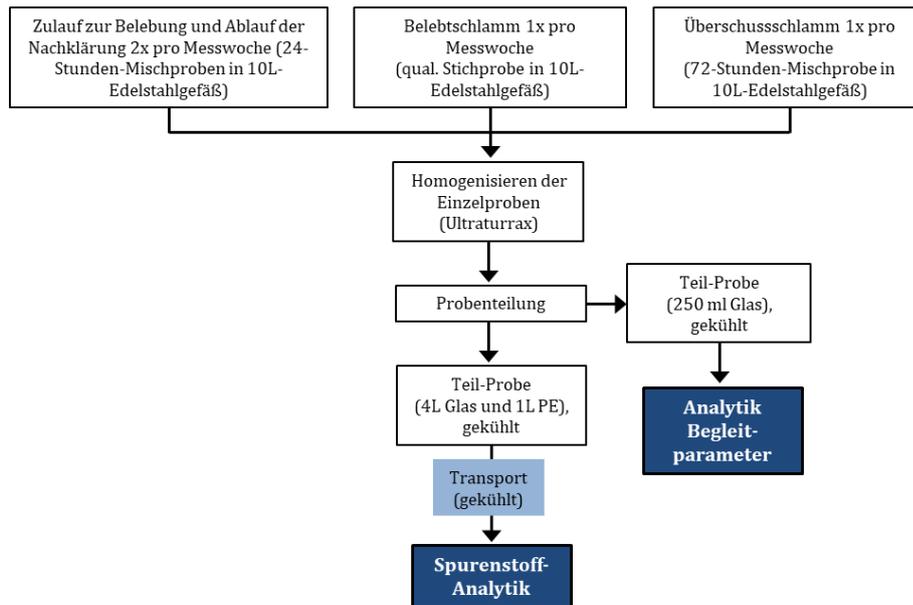


**Abbildung 7: Messpunkte auf der Modellkläranlage zur Bestimmung des betrieblichen Einflusses auf den biologischen Abbau von Spurenstoffen.**

Für diese Analysereihe wurden jeweils 24-Stunden-Mischproben an den in Abbildung 7 angegebenen Messstellen genommen. Da Messstelle 1 (Zulauf) für beide Modellkläranlagen identisch ist, umfasste ein Probenzug (1 + 3 + 3 =) 7 Proben. Vor der Probenahme wurden beiden Anlagen mit konstanten Stellgrößen für den Zeitraum von einer Woche „eingefahren“, um sicherzustellen, dass die vorhandene Belebtschlammbiozönose den aktuellen Stellgrößen entspricht. Diese Messreihe hat somit zum Ziel, vor allem den biologischen Abbau bei unterschiedlichen betrieblichen Bedingungen zu untersuchen.

Im Zu- und Ablauf erfolgt die Probenahme innerhalb der 24 stündigen Probenahme viertelstündlich mittels automatischer Probenehmer (Typ Bühler 3010). Das Probenvolumen betrug hierbei jeweils 70 bis 80 mL (gesamt 6,5 bis 8,0 L). Generell erfolgte die Probenahme zeitproportional. Die Teilproben wurden bereits im Probenehmer auf 4 °C gekühlt. Die Probenahme-schläuche waren zur Vermeidung von Adsorption mit einer Teflon-Beschichtung versehen. Zusätzlich wurden die Schläuche zur Erreichung eines Verteilungsgleichgewichtes zwischen Probenahmematerial und Abwasser vor dem Beginn der Messreihe für zwei Wochen mit Rohwasser vorbelastet.

## Ableitung von Kennwerten zur Quantifizierung der Herkunft, der Ausbreitung und des Rückhaltes



**Abbildung 8: Arbeitsablauf zur Bestimmung des biologischen Abbaus.**

**Tabelle 6: Stellgrößen für die Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus.**

Woche	vom...	bis...	V1		V2	
1	21.10.	5.12.	$Q_{zu} =$	1,10 L/h	$Q_{zu} =$	1,30 L/h
			$Q_{RZ} =$	3,30 L/h	$Q_{RZ} =$	3,90 L/h
			$Q_{RLS} =$	1,21 L/h	$Q_{RLS} =$	1,43 L/h
			$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d	$Q_{ÜSS} =$	400 mL/d
2	5.11.	13.11.	$Q_{zu} =$	1,10 L/h	$Q_{zu} =$	1,30 L/h
			$Q_{RZ} =$	3,30 L/h	$Q_{RZ} =$	3,90 L/h
			$Q_{RLS} =$	1,21 L/h	$Q_{RLS} =$	1,43 L/h
			$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d	$Q_{ÜSS} =$	600 mL/d
3	13.11.	26.11.	$Q_{zu} =$	1,10 L/h	$Q_{zu} =$	1,50 L/h
			$Q_{RZ} =$	3,30 L/h	$Q_{RZ} =$	4,50 L/h
			$Q_{RLS} =$	1,21 L/h	$Q_{RLS} =$	1,65 L/h
			$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d	$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d
4	26.11.	10.12.	$Q_{zu} =$	1,10 L/h	$Q_{zu} =$	1,70 L/h
			$Q_{RZ} =$	3,30 L/h	$Q_{RZ} =$	5,10 L/h
			$Q_{RLS} =$	1,21 L/h	$Q_{RLS} =$	1,87 L/h
			$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d	$Q_{ÜSS} =$	500 mL/d

Aufgrund des erforderlichen Probenvolumens für die Spurenstoff-Analytik (min. 3 L) konnte während der Messwoche keine Probenahme erfolgen, da ansonsten bei den relativ kleinen Belebungsvolumina (rund 30 L) die Belebtschlamm-biozönose gestört worden wäre. Es erfolgt daher am Ende der Messwoche eine qualifizierte Stichprobe. Die Bestimmung der Begleitparameter und des Trockensubstanzgehaltes war aufgrund des geringeren Probenvolumen auch innerhalb der Messwoche möglich.

Für die Spurenstoff-Analytik am Überschussschlamm wurde aufgrund der geringen Volumenströme jeweils eine 72-h-Mischprobe ebenfalls am Ende der Messwoche realisiert. Hierfür wurde der gesamte abgezogene Überschussschlamm während des Probenintervalls gekühlt

bei 4 °C gelagert. Abbildung 8 stellt den Arbeitsablauf der Probenahme, Probenvorbereitung und Probenteilung für diese Versuche dar.

Es wurden insgesamt vier Messwochen mit unterschiedlichen Stellgrößen durchgeführt (Tabelle 6). Das Rezirkulationsverhältnis ( $Q_{RZ} = 1,1 \times Q_{zu}$ ) und das Rückführverhältnis ( $Q_{RS} = 3,0 \times Q_{zu}$ ) wurden konstant gehalten. Damit stellten sich die in Tabelle 7 genannten Betriebsparameter ein. Die Versuchsreihe wurde im Dezember 2019 abgeschlossen.

**Tabelle 7: Betriebsparameter (Mittelwerte) für die Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus.**

Woche	Parameter	V1	V2
1	$TS_{BS}$ [g/l]	1,69	3,43
	$TS_{\bar{u}S}$ [g/l]	2,42	3,99
	$t_{TS}$ [d]	20	38
	$B_{TS}$ [kg O <sub>2</sub> /kg TS × d]	0,22	0,11
2	$TS_{BS}$ [g/l]	1,95	2,79
	$TS_{\bar{u}S}$ [g/l]	2,86	3,76
	$t_{TS}$ [d]	19	19
	$B_{TS}$ [kg O <sub>2</sub> /kg TS × d]	0,25	0,26
3	$TS_{BS}$ [g/l]	1,20	3,86
	$TS_{\bar{u}S}$ [g/l]	2,26	6,45
	$t_{TS}$ [d]	14	22
	$B_{TS}$ [kg O <sub>2</sub> /kg TS × d]	0,49	0,10
4	$TS_{BS}$ [g/l]	3,02	2,74
	$TS_{\bar{u}S}$ [g/l]	6,88	3,94
	$t_{TS}$ [d]	17	25
	$B_{TS}$ [kg O <sub>2</sub> /kg TS × d]	0,09	0,16

Die Bezeichnung der Proben erfolgte nach folgendem Schema:

MK – Probenort – Datum

Für den Probenort wurden bei beiden Modellkläranlagen (MK) die gemeinsame Zulaufprobe mit (Z) bezeichnet. Des Weiteren teilt sich der Probenort zunächst in beide Modellkläranlagen (1) und (2). Darauf folgt ein Index für das Medium: (2) – Belebtschlamm, (3) – Überschussschlamm, (4) – Ablauf aus dem Klarwasserabzug der Nachklärung. So bedeutet z. B. MK-1.3-191104: Probe des Überschussschlammes der Modellkläranlage 1 vom 4. Nov. 2019

### 3.4 Bestimmung von Begleitparametern

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu den in der ersten Projektphase durchgeführten Analyse. Im Labor der Versuchs- und Ausbildungskläranlage (VAK) der TH Lübeck erfolgten die Probenvorbereitung und die Bestimmung der üblichen abwassertechnischen Parameter, um den Zustand des Abwassers entsprechend des Reinigungsfortschrittes innerhalb der Kläranlage bestimmen zu können. Für alle wässrigen Proben wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur sowie die Sauerstoff-Konzentration mittels Sondenmessung unmittelbar nach deren Entnahme bestimmt. Geruch und Trübung/Farbe der Proben wurden qualitativ bestimmt und notiert.

Anhand standardisierter Küvettentests (Systemanbieter HachLange, photometrische Messung nach Reaktion) wurden die relevanten Zehr- und Nährstoffe bestimmt. Für die Analyse gelöster Inhaltsstoffe ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) wurden die Proben vorab filtriert (0,45  $\mu\text{m}$ ). Für die Bestimmung von CSB, TN und P wurden homogenisierte Proben verwendet (Ultraturrax, 20000 U/min, 2 bis 5 min je nach Feststoffgehalt der Probe). Zur Qualitätskontrolle wurden parallel die Addista-Tests (Standardlösungen) durchgeführt. Es stellten sich keine relevanten systematischen Probleme in der Analytik heraus. Die Bestimmung des BSB<sub>5</sub> erfolgte für ausgewählte Zulaufproben im temperierten Standversuch nach dem respirometrischen Prinzip (System WTW Oxitop).

Ausgewählte Beleb- und Überschussschlammproben wurden hinsichtlich des Trockensubstanzgehaltes (TS) nach dem Standardverfahren (gem. DEV) untersucht. Sowohl BSB<sub>5</sub> als auch TS dienen zur Berechnung von Schlammalter und Schlammbelastung in der biologischen Stufe (Belebtschlammverfahren).

### 3.5 Bestimmung von Spurenstoff-Konzentrationen

Die Spurenstoff-Analytik erfolgte analog zur ersten Projektphase. Von allen Proben wurde die Konzentration der Spurenstoffe bestimmt. Zur Anwendung kamen hierfür LCMS- und GCMS-Verfahren. Bestimmt wurden alle 51 in Tabelle 8 bis 13 aufgeführten Parameter mit dem angegebenen Prüfverfahren. Die Bestimmungsgrenze (BG) ist für einige Stoffe abhängig von der CSB-Konzentration.

**Tabelle 8: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Schwermetalle.**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Blei (Pb)		7439-92-1	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,005	< 0,005
Cadmium (Cd)		7440-43-9	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,001	< 0,001
Nickel (Ni)		7440-02-0	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,003	< 0,003
Quecksilber (Hg)		7439-97-6	mg/l	DIN EN 1483	< 0,0001	< 0,0001

**Tabelle 9: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Arzneistoffe.**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Carbamazepin	Antiepileptikum	298-46-4	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Ciprofloxacin	Antibiotikum (Fluorchinolon)	85721-33-1	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Coffein	Stimulans	58-08-2	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0050	< 0,02	< 0,10
Diclofenac	nichtsteroidales Antirheumatikum	15307-86-5	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Gabapentin	Antiepileptikum	60142-96-3	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Ibuprofen	nichtsteroidales Antirheumatikum	15687-27-1	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,05	< 0,10
Iopamidol	Kontrastmittel	60166-93-0	$\mu\text{g/l}$	LAM-MLC.M.0051	< 0,04	< 0,10

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Metformin	Antidiabetikum	657-24-9	µg/l	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Metoprolol	Betablocker	51384-51-1	µg/l	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Oxytetracyclin	Antibiotikum (Tetracyclin)	79-57-2	µg/l	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Sulfamethoxazol	Antibiotikum (Sulfonamid)	723-46-6	µg/l	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10
Trimethoprim	Antibiotikum (Sulfonamid)	738-70-5	µg/l	LAM-MLC.M.0051	< 0,02	< 0,10

**Tabelle 10: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Pflanzenschutzmittel.**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Aclonifen	Herbizid (Pflanzenschutzmittel)	74070-46-5	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Bifenox	Herbizid (Pflanzenschutzmittel)	42576-02-3	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Cybutryn (Irgarol)	Herbizid/ Pestizid (Antifouling und Fassaden - verboten seit 2016/ 2011)	28159-98-0	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Cypermethrin	Insektizid (Anwendung als Pflanzenschutz- und Holzschutzmittel)	52315-07-8	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,04	< 0,20
Dichlorvos	Insektizid (Schädlingsbekämpfung)	62-73-7	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Dicofol	Akarizid (gegen Milbenbefall im Obst- und Gemüsebau)	115-32-2	µg/l	LAM-MGC.M.0003	< 0,02	< 0,05
Diuron	Herbizid (Pflanzenschutzmittel)	330-54-1	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Glyphosat	Herbizid (Pflanzenschutzmittel)	1071-83-6	µg/l	DIN ISO 16308 F-45	< 0,05	< 0,05
Imidacloprid	Insektizid (Neonicotinoid)	138261-41-3	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Isoproturon	Herbizid (v.a. Getreideanbau) - verboten seit 2017	34123-59-6	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,05
Quinoxifen	Fungizid (gegen Mehltau)	124495-18-7	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Terbutylazin	Herbizid (meist als Voraufbau-Herbizid im Maisanbau)	5915-41-3	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Terbutryn	Algizid (in Dispersionsfarben) - als PSM seit 2002 nicht mehr zugelassen	886-50-0	µg/l	LAM-MLC.M.0002	< 0,02	< 0,10
Triclosan	Biozid (Desinfektionsmittel, Kosmetika etc.)	3380-34-5	µg/l	LAM-MGC.M.0003	< 0,02	< 0,02

**Tabelle 11: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK).**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Acenaphthen	Verbrennungsrückstand; Herstellung von Insektiziden, Arzneimitteln u.a.	83-32-9	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Acenaphthylen	Verbrennungsrückstand	208-96-8	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Anthracen	Verbrennungsrückstand; Verwendung als Biozid	120-12-7	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Benzo[a]-anthracen	Verbrennungsrückstand	56-55-3	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Benzo[a]-pyren	Verbrennungsrückstand	50-32-8	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Benzo[b]-fluoranthen	Verbrennungsrückstand	205-99-2	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Benzo[ghi]-perylen	Verbrennungsrückstand; Herstellung von Farbstoffen, Kunststoffen, Pestiziden u.a.	191-24-2	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Benzo[k]-fluoranthen	Verbrennungsrückstand	207-08-9	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Chrysen	Verbrennungsrückstand; UV-Filter und Farbstoff	218-01-9	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Dibenzo[ah]-anthracen	Verbrennungsrückstand	53-70-3	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Fluoranthen	Verbrennungsrückstand; Herstellung von Arzneimitteln	206-44-0	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Fluoren	Verbrennungsrückstand; Herstellung von Farbstoffen, Kunststoffen u.a.	86-73-7	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Indeno[1,2,3-cd]-pyren	Verbrennungsrückstand	193-39-5	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Naphthalin	Verbrennungsrückstand; Verwendung als Insektizid	91-20-3	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Phenanthren	Verbrennungsrückstand; Farbstoffsynthese	85-01-8	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01
Pyren	Verbrennungsrückstand; Farbstoffsynthese	129-00-0	µg/l	DIN EN ISO 17993	< 0,01	< 0,01

**Tabelle 12: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen sonstiger untersuchter Stoffe.**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Acesulfam-K	Süßstoff	55589-62-3	µg/l	LAM-MLC.M.0050	< 0,05	< 0,10
Benzotriazol	Korrosionsschutzmittel und Frostschutzmittel	95-14-7	µg/l	LAM-MLC.M.0050	< 0,05	< 0,10
Bisphenol A	Weichmacher in Kunststoffprodukten	80-05-7	µg/l	LAM-MGC.M.0003	< 0,05	< 0,10
PFOS	Imprägniermittel (Papier, Textilien, Teppiche u.a.)	1763-23-1	µg/l	DIN 38407 F-42	< 0,05	< 0,05
Sulfid		---	mg/l	DIN 38405-28	< 0,1	< 0,1
CSB		---	mg/l	DIN 38409-41-1	< 15	< 15

**Tabelle 13: Zusammenstellung und Bestimmungsgrenzen der Hauptionen.**

Parameter	Klassifikation/ Verwendung	CAS-Nummer	Einheit	Prüfverfahren	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) ≤	BG (CSB 200 mg O <sub>2</sub> /L) >
Natrium		7440-23-5	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,1	< 0,1
Kalium		7440-09-7	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,1	< 0,1
Calcium		7440-70-2	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,1	< 0,1
Magnesium		7439-95-4	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,1	< 0,1
Eisen		7439-89-6	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01
Aluminium		7429-90-5	mg/l	DIN EN ISO 11885	< 0,01	< 0,01
Chlorid		---	mg/l	DIN EN ISO 10304-1	< 0,5	< 0,5
Sulfat		---	mg/l	DIN EN ISO 10304-1	< 1	< 1

Folgende Analyse-Methoden kamen für die einzelnen Stoffe bzw. Stoffgruppen zu Anwendung:

*a) Schwermetalle Blei, Cadmium und Nickel mit ICP-OES*

Wässrige Proben werden im offenen Aufschluss mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid aufgeschlossen. Feststoffproben werden mit Salzsäure und Salpetersäure in der Mikrowelle aufgeschlossen. Die aufgeschlossenen Proben werden gemäß DIN EN ISO 11885 (2009-09) vermessen, d. h. der wässrige Aufschluss wird zerstäubt, in eine Plasmafackel überführt und die spezifischen Emissionsspektren aufgenommen und ausgewertet. Die Messung erfolgt mit einer ICP-OES vom Typ ICAP -600 (Hersteller: Thermo).

*b) Schwermetall Quecksilber mit Fließinjektionssystem*

Wässrige Proben werden in einem oxidierenden Aufschluss mit Kaliumpermanganat und Kaliumperoxidisulfat aufgeschlossen. Feststoffproben werden mit Salzsäure und Salpetersäure in der Mikrowelle aufgeschlossen. Die aufgeschlossenen Proben werden gemäß DIN EN 1483 (2007-07; Wasser) bzw. DIN EN 16175-1 (2016-12; Feststoffe) vermessen, d. h. das Quecksilber wird mit Zinn-II-Chlorid zu elementarem Quecksilber reduziert, mittels eines Inertgasstroms aus der Probe ausgetrieben und anschließend die Extinktion mittels Kalt-dampf-AAS ermittelt. Die Messung erfolgt mit einem Fließinjektionssystem vom Typ AULA – 254 Gold (Hersteller: Mercury Instruments).

*c) Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) mit LC-MS/MS*

Wässrige Proben werden mittels Festphasenextraktion (SPE; Material: Chromabond HR-X) angereichert und aufgereinigt. Feststoffproben werden nach der Gefrierdrying mit Methanol extrahiert, mit Wasser verdünnt und anschließend analog der wässrigen Proben angereichert und aufgereinigt. Die vorbereiteten Proben werden gemäß DIN 38407 F-42 (2011-03; Wasser) bzw. DIN 38414 Teil 14 (2011-08; Feststoffe) vermessen, d. h. es folgt eine flüssig-chromatographische Trennung (Gerät: Shimadzu Prominence; Säule: Nucleodur Sphinx RP, 125 x 2 mm, 5 µm) mit einem Lösungsmittelgradienten (Eluent A: 2 mmol/l Ammoniumacetat in Wasser/Methanol 9:1; Eluent B: 2 mmol/l Ammoniumacetat in Methanol) und anschließende Messung im Tandem-Massenspektrometer (ABSciex 3200 QTrap) im negativen ESI-Modus.

*d) Glyphosat mit LC-MS/MS*

Wässrige Proben werden mit Boratpuffer auf pH 9 eingestellt und dann mit Fmoc-chlorid unter Zugabe von Acetonitril derivatisiert. Feststoffproben werden mit Wasser eluiert und das

Filtrat anschließend wie eine wässrige Probe aufgearbeitet. Die vorbereiteten Proben werden gemäß DIN ISO 16308- F45 (2017-09) vermessen, d. h. es folgt eine flüssig-chromatographische Trennung (Gerät: Shimadzu Prominence; Säule: Gravity Nucleodur C18, 125 x 2 mm, 5 µm) mit einem Lösungsmittelgradienten (Eluent A: 2 mmol/l Ammoniumcarbonat in Wasser; Eluent B: 2 mmol/l Ammoniumcarbonat in Methanol) und anschließende Messung im Tandem-Massenspektrometer (ABSciex 3200 QTrap) im negativen ESI-Modus.

*e) PAK's mit LC-FD und LC-DAD*

Wässrige Proben werden mit n-Hexan extrahiert, über Kieselgel aufgereinigt, am Rotationsverdampfer aufkonzentriert und auf Acetonitril umgelöst. Feststoffproben werden mit Aceton und n-Hexan extrahiert, das Aceton mit Wasser herausgefangen, über Kieselgel aufgereinigt, am Rotationsverdampfer aufkonzentriert und auf Acetonitril umgelöst. Die vorbereiteten Proben werden gemäß DIN EN ISO 17993 (2004-03; Wasser) bzw. DIN CEN/TS 16181 (2013-12; Feststoffe) vermessen, d. h. es folgt eine flüssig-chromatographische Trennung (Gerät: Shimadzu Prominence; Säule: Nucleodur C18-PAH C18, 125 x 4 mm, 3 µm) mit einem Lösungsmittelgradienten (Eluent A: Acetonitril; Eluent B: Reinstwasser/Methanol 8:2) und anschließende Messung im Fluoreszenz- und Diodenarraydetektor.

*f) Süßstoffe, Benzotriazole und Coffein in Wasser mit LC-MS/MS*

Wässrige Proben werden nach Filtration über einen Membranfilter (0,45 µm) direkt auf 2 LC-Trennsäulen (C18-modifiziertes Kieselgel, SunShell C18, 2,6 µm, 50 mm x 2,1 mm) injiziert und am Säulenansatz fokussiert. Bei der nachfolgenden flüssig-chromatographischen Trennung (Shimadzu Nexera X2) mit einem Lösungsmittelgradienten (Eluent A: 20 mM Ammoniumformiat, 0,5 % Ameisensäure; Eluent B: Methanol, 0,1 % Ameisensäure) eluieren die Analyten als schmale Peaks und werden mit dem Tandem-Massenspektrometer (Sciex Triple Quad 5500) im positiven und negativen ESI-Modus quantitativ gegen eine externe Kalibrierung mit der Hausmethode LAM-MLC-M.0050 gemessen. Die Feststoffproben werden nach der Gefrierdrying mit Methanol/Ethylacetat extrahiert, mit Wasser verdünnt und nach der o. g. Methode bearbeitet.

*g) Arzneimittel mit LC-MS/MS*

Wässrige Proben werden nach der Filtration über Membranfilter (0,45 µm) direkt auf zwei LC-Trennsäulen (SunShell C18, 2,6 µm, 50 mm x 2,1 mm) injiziert und flüssig-chromatographisch (Shimadzu Nexera X2) mit einem Lösungsmittelgradienten (Eluent A: 20 mM Ammoniumformiat, 0,5 % Ameisensäure; Eluent B: Methanol, 0,1 % Ameisensäure) aufgetrennt und mit dem Tandem-Massenspektrometer (Sciex Triple Quad 5500) im positiven und negativen ESI-Modus quantitativ gegen eine externe Kalibrierung mit der Hausmethode LAM-MLC-M.0051 gemessen. Metformin und Röntgenkontrastmittel (z.B. Iopamidol) werden auf einer Hypercarb-Säule getrennt. Die Feststoffproben werden nach der Gefrierdrying mit Methanol/Ethylacetat extrahiert, mit Wasser verdünnt und nach der o. g. Methode bearbeitet.

*h) Pestizide mit LC-MS/MS*

Wässrige Proben werden nach der Filtration über Membranfilter (0,45 µm) direkt auf C18-modifiziertes Kieselgel injiziert und flüssig-chromatographisch (Shimadzu Nexera X2) mit einem Lösungsmittelgradienten aufgetrennt und mit dem Tandem-Massenspektrometer (Sciex Triple Quad 5500) im positiven ESI-Modus quantitativ gegen eine externe Kalibrierung mit der Hausmethode LAM-MLC-M.0002 gemessen. Die Feststoffproben werden nach der Gefrierdrying mit Methanol/Ethylacetat extrahiert, mit Wasser verdünnt und nach der o. g. Methode bearbeitet.

*i) Unpolare Kontaminanten mit GC-MS/MS*

Die wässrigen, unfiltrierten Proben werden mit Schwefelsäure angesäuert und nach Zugabe eines internen Standards mit Hexan/Ethylacetat extrahiert und mittels GC-MS/MS (Agilent 7000) gegen eine externe Kalibrierung mit der Hausmethode LAM-MGC.M.003 (in Anlehnung

an DIN 38407-37) quantifiziert. Die Feststoffproben werden nach der Gefriertrocknung mit Methanol/Ethylacetat extrahiert, mit Wasser verdünnt und nach der o.g. Methode bearbeitet.

*j) Kationen: Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und Aluminium mit ICP-OES*

Die wässrigen Proben werden im offenen Aufschluss mit Salpetersäure und Wasserstoffperoxid aufgeschlossen. Die aufgeschlossenen Proben werden gemäß DIN EN ISO 11885 (2009-09) vermessen, d. h. der wässrige Aufschluss wird zerstäubt, in eine Plasmafackel überführt und die spezifischen Emissionsspektren aufgenommen und ausgewertet. Die Messung erfolgt mit einer ICP-OES vom Typ ICAP -600 (Hersteller: Thermo).

*k) Anionen: Chlorid und Sulfat mit IC*

Die wässrigen Proben werden filtriert, mit Pufferlösung versehen und in der Ionenchromatographie gemäß DIN EN ISO 10304-1 (D20; 2009-07) gegen eine externe Kalibrierung vermessen und quantifiziert. Die Trennung der Anionen erfolgt auf einer Säule vom Typ A Supp 5. Die Messung erfolgt mit einem Ionenchromatographen vom Typ 761 Compact IC (Hersteller: Metrohm).

*l) Sulfid*

Die wässrigen Proben werden in einen Reaktionskolben gegeben, in dem Phthalat-Pufferlösung und EDTA-Lösung vorgelegt wurden. In ein Absorptionsgefäß wird Zinkacetatlösung gefüllt. Durch die Apparatur wird 1 Stunde lang Stickstoff geleitet und dabei das Sulfid in das Absorptionsgefäß überführt. In das Absorptionsgefäß wird anschließend Farbreagenz und Ammoniumeisen-III-sulfat gegeben und nach einer Wartezeit von 10 min die Extinktion der Lösung bei 665 nm gemessen. Der Gehalt an Sulfid wird dann unter Berücksichtigung des eingesetzten Volumens und des Reziprokwertes der Steigung der Kalibrierkurve berechnet. Die Bestimmung des Sulfidgehaltes erfolgt gemäß DIN 38405-27 (D27; 2017-10). Die Messung der Extinktion erfolgt mit einem Photometer vom Typ „Helios Alpha“ (Hersteller: Unicam).

*m) CSB*

Die wässrigen Proben werden mit einem Ultra Turrax homogenisiert und ein Aliquot des Homogenisats in ein Schliffglas überführt. Es werden Kaliumdichromatlösung und Silbersulfat-Schwefelsäure zugegeben. Die Lösung wird erhitzt und 2 Stunden am Sieden gehalten. Die abgekühlte und verdünnte Lösung wird mit Ferroin-Indikatorlösung versetzt und das noch vorhandene Dichromat mit Ammoniumeisen-II-sulfatlösung titriert, bis die Farbe von grün nach rot umschlägt. Der CSB wird dann unter Berücksichtigung des eingesetzten Probevolumens, des Volumens an verbrauchter Ammoniumeisen-II-sulfatlösung und der Konzentration der Ammoniumeisen-II-sulfatlösung berechnet. Die Bestimmung des CSB erfolgt gemäß DIN 38409 Teil 41-1 (1980-12).

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Fällversuche

Die Fällung kann für einzelne Spurenstoffe einen nennenswerten Einfluss auf deren Rückhalt haben. Neben der direkten Fällung hat die Gabe eines Fällmittels auch einen Einfluss auf die anschließende Flockung (vgl. Abs. 2.5). In einer Versuchsreihe wurde daher der spezifische Einfluss der Fällung auf das Verhalten der Spurenstoffe untersucht. Hierbei wurden einerseits **Belebtschlammproben** verwendet, entsprechend einer **Simultanfällung**. Andererseits wurden **Klarwasserproben** genutzt, um eine **Nachfällung** abzubilden (vgl. Abs. 3.1.1). Die Ergebnisse der Fällversuche sind in **Anhang 1** zusammengestellt.

Es erfolgt zunächst eine Darstellung der Einzelergebnisse für alle Stoffe. Eine abschließende Bewertung und Diskussion der Fällversuche folgt in Abs. 4.1.4.

#### 4.1.1 Einfluss auf Nähr- und Zehrstoffe

Obschon die Fällung in erster Linie auf den Rückhalt von Phosphor zielt, kann sie einen Einfluss auf weitere Zehrstoffe (zusammengefasst mit dem CSB) und Nährstoffe (hier: Stickstoffverbindungen) haben. Daher werden diese Parameter ebenfalls berücksichtigt.

##### *Gesamt-Stickstoff (TN)*

Wie Anhang 1.2.1 zeigt, hat  $\text{FeCl}_3$  keinen positiven Einfluss auf die Entfernung von Gesamtstickstoff aus dem Belebtschlamm. Auch für das Klarwasser ist kein verbesserter Rückhalt erkennbar. Die Eliminationsrate liegt zwischen 3,2 % und 6,8 %, wenn sich  $\beta$  von 1 auf 4 ändert. Daher kann  $\text{FeCl}_3$  keine signifikante Rolle bei der Eliminierung des Gesamtstickstoffs aus dem Abwasser spielen.

$\text{FeClSO}_4$  kann 11% bzw. 15% des gesamten Stickstoffs aus dem Schlamm entfernen, wenn seine Dosierung auf  $\beta = 1$  bzw. 4 festgelegt wird. Andere Dosierungen zeigten für diesen Fall eine kleinere Eliminationsrate. Darüber hinaus stieg die Eliminationsrate durch Zugabe von  $\text{FeClSO}_4$  zum Klarwasser auf 7,6 % bei  $\beta = 1$  und erhöhte sich auf 10,6 % bei  $\beta = 2$ , nahm dann bei  $\beta = 3$  auf 8,9 % ab und stieg schließlich bei  $\beta = 4$  auf 13,0 % an. Daher hat  $\text{FeClSO}_4$  eine nahezu ähnliche Leistung bei der Entfernung von Gesamtstickstoff aus Belebtschlamm und Klarwasser gezeigt.

Wenn die Dosierung von  $\text{AlCl}_3$  auf  $\beta = 1$  ansteigt, stieg die Eliminationsrate des Gesamtstickstoffs aus dem Schlamm auf 20,7 % und blieb dann für die höheren Dosierungen relativ stabil. Der Einfluss dieses Fällmittels auf Klarwasser zeigt keinen deutlichen Einfluss. Bei einer Dosierung von  $\beta = 1$  erreichte die Eliminationsrate bei 6,5 % das maximale Niveau. Daher kann  $\text{AlCl}_3$  effektiver sein, wenn es in der Simultanfällung angewendet wird.

Die Entfernung des Gesamtstickstoffs aus dem Schlamm stieg dramatisch auf 60%, wenn die Dosierung von  $\text{PACl}$  auf  $\beta = 1$  festgelegt wurde. Bei höheren Dosierungen bleibt die Eliminationsrate nahezu konstant. Die Eliminationsraten für Klarwasser beträgt bei einer Dosierung von  $\beta = 1$  etwa 14,5 % und erreichte mit 17,9 % bei  $\beta = 4$  ein Maximum. Folglich wird  $\text{PACl}$  dringend empfohlen, um Gesamt-Stickstoff im Überstandswasser des Belebtschlammes zu reduzieren. Wie die weiteren Ergebnisse zeigen (s. u.:  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , die allesamt wenig durch  $\text{PACl}$  beeinflusst werden), hat die Gabe von  $\text{PACl}$  vor Allem einen Einfluss auf organische Stickstoff-Verbindungen.

##### *$\text{NH}_4\text{-N}$*

Es kann kein Einfluss von  $\text{FeCl}_3$ , und  $\text{FeClSO}_4$  auf den Rückhalt von Ammonium weder im Belebtschlamm noch im Klarwasser erkannt werden.

Bei einer  $\text{AlCl}_3$ -Dosierung von  $\beta = 2$  steigt die Eliminationsrate von  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus dem Klarwasser auf 17,1 % und fällt dann bei  $\beta = 3$  auf 5,9 % ab. Bei  $\beta = 1$  und  $\beta = 4$  war dieses Fällmittel unwirksam.  $\text{AlCl}_3$  war auch bei der Entfernung von  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus Belebtschlamm unwirksam.

Die Eliminationsrate von  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus dem Belebtschlamm beträgt etwa 16,7 % bei einer  $\text{PACl}$ -Dosierung von  $\beta = 1$ . In anderen Dosierungen war dieses Fällmittel nicht wirksam.  $\text{PACl}$  hatte überdies keinen positiven Effekt auf die Entfernung von  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus dem Überstand.

#### *$\text{NO}_2\text{-N}$*

Da Nitrit ( $\text{NO}_2$ ) in nur sehr geringen Konzentrationen vorliegt und es i.d.R. während der Nitrifikation zu Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) weiteroxidiert wird ist die Betrachtung der Fällungsmechanismen nicht zielführend. Gleiches gilt für die Betrachtung analytischer Probleme durch die Gabe von Co-Substraten. Die in Anhang 2.2.1 dargestellten Eliminationsraten von z. T. über 90 % sind daher vielmehr einer nicht vollständig unterbundenen Nitrifikation während der Beprobung und Analyse und einer eingeschränkten Genauigkeit der verwendeten Küvettentests in diesem Konzentrationsbereich geschuldet.

#### *$\text{NO}_3\text{-N}$*

Mittels  $\text{FeCl}_3$  konnte kein Nitrat aus dem Abwasser entfernt werden. Bei einer Dosierung von  $\beta = 2$  bzw. 4 wurden (als Maximalwerte) 1,7 % bzw. 2,1 % im Belebtschlamm bzw. im Klarwasser entfernt. Mit  $\text{FeClSO}_4$  wurden etwa 1,8 % bei einer Dosierung von  $\beta = 1$  aus dem Belebtschlamm entfernt. Auf die Klarwasserproben hatte dieses Fällmittel keinen (bzw. einen rechnerisch negativen) Einfluss. Das Fällmittel eignet sich daher nicht, um Nitrat zu fällen. Durch  $\text{AlCl}_3$  und  $\text{PACl}$  wird Nitrat überdies nicht beeinflusst (max. Eliminationsraten 5 %).

#### *CSB*

Bei  $\beta = 1$  ist  $\text{FeCl}_3$  unwirksam, um CSB aus dem Schlamm zu entfernen. Wenn die Dosierung auf  $\beta = 2$  ansteigt, kann eine höhere Eliminationsrate von 25,7 % festgestellt werden. Diese sinkt auf 9,4 % bei  $\beta = 3$  und steigt schließlich auf 20,3 % bei  $\beta = 4$ . Im Klarwasser gibt es einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Dosierung ( $\beta = 1$  bis 4) und der Eliminationsrate (28,6 bis 47,3 %). Im Allgemeinen zeigte  $\text{FeCl}_3$  im Vergleich zum Schlamm eine bessere Leistung bei der Entfernung von CSB aus dem Klarwasser.

Bei der Dosierung von  $\text{FeClSO}_4$  konnten im Belebtschlamm maximale Eliminationsraten von 13,8 % erreicht werden. Deutlich effektiver war die Anwendung im Klarwasser. Bereits bei einer geringen Dosierung ( $\beta = 1$ ) beträgt die Eliminationsrate 53,8 %. Bei hoher Dosierung ( $\beta = 4$ ) steigt diese auf 65,7 %. Bei einer mittleren Dosierung von  $\beta = 3$  ist der Einsatz des Fällmittels am effizientesten hinsichtlich der Elimination von CSB im Klarwasser.

Wenn  $\text{AlCl}_3$  für die Fällung im Belebtschlamm verwendet wird, steigt die Eliminationsrate von 24,8 auf 50,5 %, wenn die Dosierung von  $\beta = 1$  auf 4 erhöht wird. Im Klarwasser variiert die Eliminationsrate sehr stark in Abhängigkeit der Dosierung. Gründe hierfür liegen vermutlich in einer fehlerhaften Analyse<sup>2</sup>. Aus dem gleichen Grund können die Ergebnisse für das Klarwasser nicht ausgewertet werden.

Bei der Verwendung von  $\text{PACl}$  zeigt sich im Belebtschlamm kein einheitliches Muster. Im Klarwasser konnten Eliminationsraten 35,7 bis 58,9 % (für  $\beta = 1$  bis 4) ermittelt werden. Die effizienteste Dosierung liegt demnach bei  $\beta = 3$ .

#### *Gesamt-Phosphor*

Wenn die Dosierung von  $\text{FeCl}_3$  von  $\beta = 1$  auf 4 ansteigt, nimmt die Eliminationsrate im Belebtschlamm von 54,1 % auf 94,0 % zu. Die Eliminationsraten für das Klarwasser folgen einem

---

<sup>2</sup> Die Auswertung der parallel erfolgten Qualitätstests (Aufstockversuche) zeigt an, dass die für diese Analyse Küvetten-Charge fehlerhaft gewesen sein muss.

ähnlichen Muster und steigen von 47,0 auf 94,1 %. Zwischen einer Dosierung von  $\beta = 3$  auf 4 ist im Klarwasser keine deutliche Steigerung mehr erkennbar (Anhang 1.2.1).

Die Eliminationsrate aus dem Schlamm steigt auf 56,7 %, bei einer Dosierung von  $\beta = 1$  bei  $\text{FeClSO}_4$ . Sie nimmt weiter zu auf 77,6 % bzw. 87,0 % (bei  $\beta = 2$  bzw. 3). Durch Erhöhen der Dosierung auf  $\beta = 4$  bleibt die Eliminationsrate fast unverändert (88,0 %). Im Klarwasser ist ein fast linearer Trend zwischen  $\beta = 1$  bis 4 erkennbar (Eliminationsraten 40,7 bis 89,0 %).

Vergleichbar sind die Eliminationsraten von  $\text{AlCl}_3$ . Diese steigen mit den Dosierungen von 55,8 auf 92,0 % (für  $\beta = 1$  bis 4). Die höchste Effizienz wird bei  $\beta = 3$  erreicht (88,5 %). Im Klarwasser steigen die Eliminationsraten von 23,0 auf 61,5 % (für  $\beta = 1$  und 2). Die Zunahme ist für hohe Dosierungen weniger deutlich (83,0 und 88,4 % für  $\beta = 3$  bis 4). Auch hier ist die Dosierung von  $\beta = 3$  am effizientesten.

Bei der Verwendung von PACl beträgt die Elimination aus dem Belebtschlamm 37,4 % bei einer Dosierung von  $\beta = 1$ . Sie steigt sukzessive auf 91,4 % bei der höchsten getesteten Dosierung. Vergleichbar steigt die Elimination aus dem Klarwasser von 37,6 auf 91,6 % (für  $\beta = 1$  bis 4).

#### *Ortho-Phosphat*

Die Eliminationsrate von Ortho-Phosphat aus Belebtschlamm steigt bei der Verwendung von  $\text{FeCl}_3$  von 54,1 auf 95,0 % bei einer Dosierung von  $\beta = 1$  bis 3. Bei einer höheren Dosierung ( $\beta = 4$ ) beträgt sie 98,0 %. Vergleichbar sind die Eliminationsraten bei der Anwendung in Klarwasser (53,7 bis 97,8 bei  $\beta = 1$  bis 3 und 99,3 % bei  $\beta = 4$ ). Eine Dosierung von  $\beta = 3$  ist daher am effizientesten.

Bei der Verwendung von  $\text{FeClSO}_4$  im Belebtschlamm beträgt die Eliminationsrate 64,9 % bei einer Dosierung von  $\beta = 1$ . Sie steigt auf bis zu 96,2 % bei einer hohen Dosierung ( $\beta = 4$ ). Die Eliminationsrate im Klarwasser steigt von 67,5 % ( $\beta = 1$ ) auf 98,2 % ( $\beta = 3$ ). Bei höheren Dosierungen ( $\beta = 4$ ) wird ortho-Phosphat nahezu vollständig entfernt (99,7 %).

Mit dem Fällmittel  $\text{AlCl}_3$  steigt im Belebtschlamm die Eliminationsrate von 69,0 auf 95,7 %, wenn die Dosierung von  $\beta = 1$  auf 3 erhöht wird. Bei einer höheren Dosierung  $\beta = 4$  steigt die Eliminationsrate auf 98,2 %. Vergleichbar sind die Eliminationsraten im Klarwasser (47,4 bis 99,8 %).

Die Eliminationsrate beträgt bei der Verwendung von PACl 41,4 % bei der geringsten Dosierung ( $\beta = 1$ ). Sie steigt auf 92,1 bzw. 97,2 % bei höheren Dosierungen ( $\beta = 3$  bzw. 4). Vergleichbar sind die Eliminationsraten im Klarwasser (42,1 bis 95,7 % für  $\beta = 1$  bis 4). Es kann somit kein signifikanter Unterschied zwischen der Simultan- und der Nachfällung bei der Verwendung von PACl festgestellt werden.

### **4.1.2 Einfluss auf Spurenstoffe**

Die Ergebnisse der Spurenstoffanalyse sind in Anhang 1.1 und 1.2.4 zusammengestellt.

#### *Stoffgruppe I*

Der erhöhte Rückhalt von Vertretern der Stoffgruppe I (nicht biologisch abbaubar, nicht sorptionsaffin) mittels Flockung ist kaum möglich. Allein die Fällung wäre ein denkbarer Mechanismus, der einzelne Substanzen affektieren könnte.

Die Gabe von Fällmittel zeigt weder im Belebtschlamm noch im Klarwasser einen deutlichen Effekt auf **Carbamazepin**. Allein für  $\text{AlCl}_3$  im Klarwasser scheint es eine negative Korrelation ( $r^2 = -0,88$ ) zwischen Dosierung und Konzentration zu geben. Die Eliminationsraten betragen allerdings maximal 11,3 %. Im Belebtschlamm führt die Verwendung von  $\text{FeCl}_3$  in allen Proben der Versuchsreihen zu einer Elimination. Diese variiert zwischen 3,4 und 15,2 % und hängt nicht linear von der Dosierung ab ( $r^2 = 0,13$ ).

Bei der Verwendung von  $\text{FeClSO}_4$  im Klarwasser wurde **Imidacloprid** in allen Versuchsreihen mit mindestens 14,9 % eliminiert<sup>3</sup>. Ansonsten hat die Gabe von Fällmitteln keinen Einfluss auf diesen Stoff.

Die weiteren Einzelsubstanzen der Stoffgruppe I (**Iopamidol, Diuron, Isoproturon, Terbutryn**) konnten in diesen Versuchsreihen nicht nachgewiesen werden. Die nachweisbaren Stoffe (**Carbamazepin, Imidacloprid**) können nur wenig durch die Fällmittel beeinflusst werden. Ein gezielter Rückhalt dieser Stoffe durch Fällung kann jedenfalls ausgeschlossen werden.

### *Stoffgruppe II*

Hinsichtlich der dieser Stoffgruppe zugeordneten **Schwermetalle** fällt bei der Gabe der Fällmittel  $\text{FeCl}_3$  und  $\text{FeClSO}_4$  im Klarwasser auf, dass **Nickel** mit zunehmenden Konzentrationen nachweisbar ist (vgl. Anhang 1.2.4,  $r^2 = 0,99$  bzw.  $0,97$ ). Von Margot (2015, S. 55) und Buzier et al. (2006) werden verunreinigte Fällmittel (mehr als 40 mg Ni/L) als mögliche Ursache genannt. Die hier verwendeten Fällmittel (vgl. Abs. 3.1.1.) weisen lt. Datenblätter vergleichbare Nickel-Konzentrationen auf ( $\text{FeClSO}_4$ : 32 mg Ni/kg und  $\text{FeCl}_3$ : 35 mg Ni/kg). Überschlägig kann die festgestellte Zunahme durch eine solche Unreinheit erklärt werden. Zugleich erklärt sie die sehr hohe Korrelation. Bei der Anwendung im Belebtschlamm ist dieses Phänomen nicht zu beobachten. Es ist zu vermuten, dass die durch Fällmittel zusätzlich eingebrachte Nickel-Fracht vermehrt am Belebtschlamm sorbiert. Die aluminiumbasierten Fällmittel weisen in der Regel keine erhöhten Nickel-Konzentrationen auf (z.B. PACl: < 0,5 mg Ni/kg lt. Datenblatt).

Die anderen in dieser Studie berücksichtigten Schwermetalle (**Blei, Quecksilber, Cadmium**) waren in dieser Versuchsreihe nicht nachweisbar. Da alle als sehr sorptionsaffin gelten, ist davon auszugehen, dass durch Fällmittel keine wesentliche Beeinflussung erfolgt.

Für weitere Vertreter der Stoffgruppe II (z. B. viele **PAK**) konnten keine auswertbaren Daten erhoben werden. Da in dieser Versuchsreihe neben dem Klarwasserablauf aus der Nachklärung nur das Überstandswasser des Belebtschlamm (nach Sedimentation) untersucht wurde (vgl. Abs. 3.1.1), wäre zu vermuten, dass die Stoffe der Stoffgruppen II aus diesem Grund kaum nachweisbar sind.

Die ohnehin sorptionsaffinen Substanzen der Stoffgruppe II werden i.d.R. gut zurückgehalten, wenn eine gute fest-flüssig-Trennung am Ende des Reinigungsprozesses erfolgt. Ein verbesserter Rückhalt wäre daher nur im Einzelfall für einzelne Vertreter zu erwarten. Für die im Rahmen dieser Studie berücksichtigten Stoffe ist das allerdings nicht nachweisbar, da ohnehin ein weitgehender Rückhalt vorliegt.

### *Stoffgruppe III*

Zur Stoffgruppe III gehören viele Vertreter der Arzneistoffe, da sie gut wasserlöslich sind und nicht zur Sorption neigen. Ein verbesserter Rückhalt wäre daher ggf. infolge einer Verschiebung der Potentialkurven (mit der Folge einer Flockung) oder einer vorherigen Fällung denkbar (vgl. Abs. 2.5).

**Ciprofloxacin** kann durch die Anwendung von Fällmitteln relativ gut aus dem Abwasser eliminiert werden. Im Belebtschlamm zeigen sich insbesondere bei  $\text{FeCl}_3$  hohe Eliminationsraten (bis 76,5 % bei  $\beta = 4$ ), die überdies sehr gut mit der Dosierung korrelieren ( $r^2 = -0,91$ ). Für die Fällmittel  $\text{FeClSO}_4$  und PACl konnte ein ähnliches, obschon nicht so effektives Verhalten festgestellt werden. Die Verwendung von  $\text{AlCl}_3$  führt bereits bei einer geringen Dosierung ( $\beta = 1$ ) zu einer Eliminationsrate von 61,5 %. In den Proben mit höherer Dosierung konnte Ciprofloxacin nicht mehr nachgewiesen werden (Bestimmungsgrenze: 0,02  $\mu\text{g/L}$ ). Bezogen auf die

---

<sup>3</sup> Es ist fraglich, ob in diesem Fall wirklich ein Trend daraus abzuleiten ist. Die angegebenen Konzentrationen (0,05 bis 0,07  $\mu\text{g/L}$ ) liegen unmittelbar oberhalb der Bestimmungsgrenze (hier: 0,02  $\mu\text{g/L}$ ). Die Genauigkeit in diesem Messbereich wird mit 0,01  $\mu\text{g/L}$  angegeben.

Konzentration des Nulltests (0,13 µg/L) würde sich eine Eliminationsrate von mindestens 84,6 % ergeben.

Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch bei der Fällung im Klarwasser. Die durchgängig sehr hohen Korrelationskoeffizienten ( $r^2 < -0,97$ ) zeigen an, dass der Stoff effektiv durch die Zugabe verschiedener Fällmittel entfernt werden kann. Die Dosierung korreliert linear mit der Eliminationsrate. Die im Rahmen dieser Versuchsreihe realisierte maximale Dosierung führt zu maximalen Eliminationsraten von 60 % (FeClSO<sub>4</sub> in Belebtschlamm) und 76,5 % (FeCl<sub>3</sub> in Belebtschlamm).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Ciprofloxacin relativ gut durch die Zugabe von Fällmitteln aus dem Abwasser entfernt werden kann. Zwischen der Dosierung und der Restkonzentration liegt ein deutlich linearer Zusammenhang vor, was darauf hindeutet, dass der Stoff vorrangig durch Fällung (weniger durch primäre Flockung) aus dem Abwasser entfernt wird.

Für **Diclofenac** zeigt sich bei der Fällung / Flockung im Belebtschlamm insbesondere bei der Verwendung von FeCl<sub>3</sub> eine deutliche Abhängigkeit zwischen Dosierung und Restkonzentration ( $r^2 = -0,95$ ). Für weitere Fällmittel und Medien ergeben sich ähnliche hohe Korrelationen. Dieses deutet darauf hin, dass Diclofenac infolge einer Fällung (weniger durch eine primäre Flockung) aus dem Abwasser entfernt werden kann. Die festgestellten Eliminationsraten liegen im Wesentlichen zwischen 10 und 20 %.

Der Prozess scheint im Belebtschlamm besser zu funktionieren. Jedenfalls wurden in den Klarwasser-Proben insbesondere bei hohen Dosierungen (von FeClSO<sub>4</sub> und PACl) negative Eliminationsraten ermittelt. Die Gründe für dieses Verhalten sind unklar.

Auf die in den Proben nachweisbare Konzentration von **Gabapentin** hat die Fällmittel-Gabe keinen deutlichen Einfluss. Die rechnerischen Eliminationsraten variieren zwischen -7,1 und +14,3 %. Ein Muster, welches die spezifische Wirkung eines Fällmittels zeigen würde, ist nicht erkennbar. Es ist daher nicht von einer Fällung oder verbesserten Flockung auszugehen.

Gleiches lässt sich für **Metoprolol** feststellen. Eine Fällung oder Flockung ist auf Basis der Daten nicht erkennbar. Im Gegenteil liegt für einige Kombinationen eine ausgeprägte positive Korrelation zwischen der nachweisbaren Konzentration und der Dosierung vor (z. B. bei der Verwendung von FeClSO<sub>4</sub> in Klarwasser mit  $r^2 = 0,93$  oder AlCl<sub>3</sub> im Belebtschlamm mit  $r^2 = 0,85$ ). Die Spurenstoff-Konzentrationen nehmen also mit der Dosierung dieser Fällmittel zu. Diese Beobachtung ist vermutlich damit zu begründen, dass sich Wasserstoff-Brückenbindungen infolge der Zugabe des Fällmittels lösen und der Stoff anschließend nachweisbar wird<sup>4</sup>.

Für die Entfernung von **Sulfamethoxazol** hat die Verwendung von Fällmitteln einen positiven Einfluss. Es werden bei maximaler Dosierung Eliminationsraten von 13,2 % (Belebtschlamm) und 18,0 % (Klarwasser) bei der Verwendung von FeCl<sub>3</sub> erzielt. Die Restkonzentrationen korrelieren dabei stark linear mit der Dosierung ( $r^2 = -0,97$  bzw.  $-0,87$ ). Für die Verwendung der anderen Fällmittel zeigt sich kein Muster, obschon z.T. nennenswerte Eliminationsraten erreicht werden (bis zu 13 % für FeClSO<sub>4</sub> in Belebtschlamm oder AlCl<sub>3</sub> in Klarwasser). Zugleich werden aber für diese Fällmittel auch erhebliche negative Eliminationsraten erkennbar. Daraus wird geschlossen, dass nur die Verwendung von FeCl<sub>3</sub> einen positiven Rückhalt dieses Arzneistoffes hat. Die Nachfällung ist dabei effizienter als die Simultanfällung.

Für das Antibiotikum **Trimethoprim** ist kein einheitlicher Trend bei Zugabe eines Fällmittels erkennbar. Bei der Verwendung von FeCl<sub>3</sub> im Belebtschlamm gibt es eine deutliche Abhängigkeit der Restkonzentration und der Dosierung ( $r^2 = -0,85$ ), was zu einer maximalen Eliminationsrate von 8,6 % führt. Ähnliches konnte für die Anwendung von AlCl<sub>3</sub> im Klarwasser beobachtet werden ( $r^2 = -0,95$  bei einer maximalen Eliminationsrate von 15,4 %). Auffällig ist für beide genannten Kombinationen, dass es im jeweils anderen Medium keinen Einfluss

<sup>4</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zu konjugierten System im Abs. 3.4.2 des Vollberichts der 1. Projektphase.

des Mediums auf den Rückhalt zu geben scheint. Bezüglich der anderen beiden Fällmittel ist kein klarer Einfluss erkennbar. Es wird daraus geschlossen, dass dieser Spurenstoff nicht gezielt durch die Zugabe eines Fällmittels eliminiert werden kann.

Das Breitbandherbizid **Glyphosat** kann vergleichsweise gut mittels Fällung / Flockung aus dem Abwasser entfernt werden. Für alle berücksichtigten Fällmittel ist eine gute bis sehr hohe Korrelation zwischen Rest-Konzentration und Dosierung nachweisbar (von  $r^2 = -0,52$  für  $\text{FeCl}_3$  in Klarwasser bis  $-0,96$  für  $\text{AlCl}_3$  in Belebtschlamm. Die erreichbaren Eliminationsraten nehmen daher mit Dosierung zu und erreichen in vielen Fällen ihren Peak bei  $\beta = 2$  oder  $3$ , um bei einer höheren Dosierung abermals zu sinken. Die maximalen Eliminationsraten liegen in einem Bereich von  $86,7$  bzw.  $82,0$  % ( $\text{FeCl}_3$  in Belebtschlamm bzw. Klarwasser,  $\beta = 3$ ). Bei der Verwendung von  $\text{AlCl}_3$  werden gar größere Eliminationsraten erreicht ( $91,0$  % in Belebtschlamm für  $\beta = 4$  und  $94,1$  % im Klarwasser für  $\beta = 3$ ). Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass es für die Entfernung von Glyphosat eine ideale Dosierung (etwa bei  $\beta = 3$ ) gibt, die zu maximalen Eliminationsraten führt.

Die für die PAK **Naphthalin** und **Phenanthren** festgestellten Konzentrationen bewegen sich überwiegend im unteren Bereich des Analysebereichs (meist  $\leq 0,03$   $\mu\text{g/L}$ ; Bestimmungsgrenze:  $0,01$   $\mu\text{g/L}$ ). Die Genauigkeit in diesem Konzentrationsbereich beträgt  $0,01$   $\mu\text{g/L}$ . Die angegebenen Eliminationsraten von  $33$  bzw.  $50$  % resultieren aus einer Variation innerhalb dieser Grenzen. Sie sind daher nicht aussagekräftig. Ein Trend ist nicht ableitbar.

Bezüglich des Stoffes **Benzotriazol** kann keine systematische Wirkung der Fällmittel-Gabe auf den Rückhalt festgestellt werden.

#### *Stoffgruppe IV*

Es konnten für die Spurenstoffe dieser Stoffgruppe keine auswertbaren Daten erhoben werden. Wie bei den Substanzen der Stoffgruppe II werden diese i.d.R. gut infolge Sorption (z. B. am Belebtschlamm) zurückgehalten. Es ist daher schlüssig, dass in diesen Versuchsreihen (Klarwasser und Überstandswasser) diese Stoffe nicht nachweisbar waren.

#### *Stoffgruppe V*

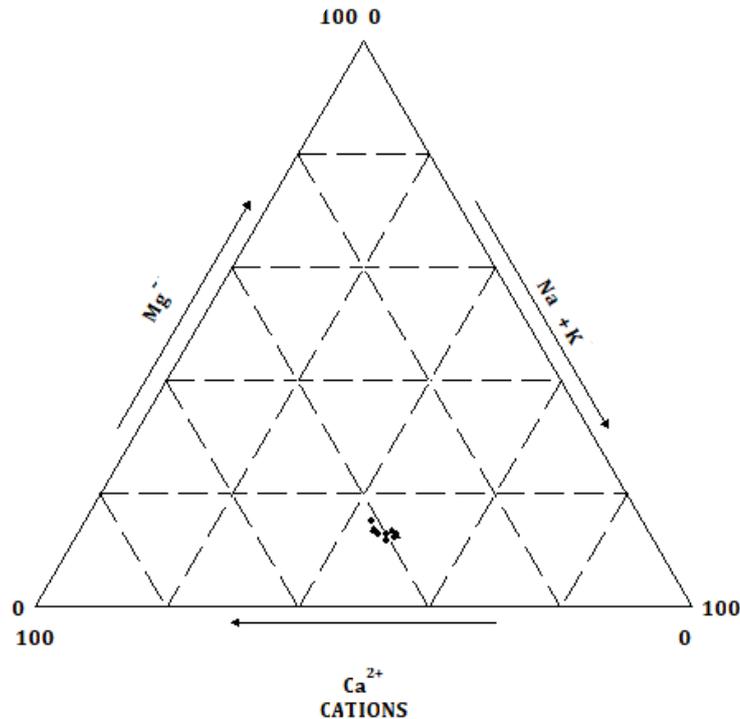
Ein relevanter Einfluss der Fällmittel-Gabe auf die sehr gut biologisch abbaubaren Stoffe der Gruppe V lässt sich hinsichtlich einer verbesserten Eliminationsrate kaum erwarten. So sind die in den Fällversuchen ermittelten absoluten Konzentrationsreduktionen (bis max.  $0,05$   $\mu\text{g/L}$ ) vernachlässigbar im Vergleich zum Anteil der biologisch im Belebungsbecken abgebaut wird (häufig mehr als  $100$   $\mu\text{g/L}$ , vgl. Anhang 3). Ähnliches gilt für Metformin und Acesulfam-K. Es ist daher nicht zielführend, einen verbesserten Stoffrückhalt infolge Fällung für diese Stoffgruppe anzustreben.

### **4.1.3 Einfluss auf die Verteilung der Hauptionen und Ionenbilanz**

Durch eine zusätzliche Bestimmung der Hauptionen an den Proben der Fäll- und Co-Substrat-Versuche sollte untersucht werden, ob im Rahmen der realisierten Dosierungen eine Beeinflussung der Ionenbilanz erreicht wird, die beispielsweise zu einer erhöhten Fällung führen könnte. Dieses wäre bei einer Verschiebung der Potentialkurven (vgl. Abs. 2.5 mit Abbildung 3) denkbar. Die Ergebnisse bzgl. der Hauptionen sind in Anhang 1.2.3. grafisch aufbereitet.

Ferner ist zu prüfen, inwieweit die Ionenverteilung in den Proben einen Einfluss auf mögliche Fällungs- oder Flockungsprozesse haben kann. So wäre beispielsweise denkbar, dass es Unterschiede in der Ionenverteilung zwischen Trocken- und Regenwetter gibt, die schließlich zu einem veränderten Verhalten führen könnten.

Wie Abbildung 9 zeigt, ist die festgestellte Ionenverteilung für alle Nullproben vergleichbar. D.h., dass trotz vorhandener Niederschläge keine Verschiebung der Ionenverteilung nachweisbar ist. Bezüglich der Kationenverteilung dominiert ein Calcium- bzw. Natrium- und Kaliumhaltiger Wassertyp.



**Abbildung 9: Piper-Diagramm (Kationenverteilung) für die Nullproben.**

Dargestellt sind jeweils alle Vergleichsproben (Nullproben) der Versuchsreihen zur Untersuchung der Fällmittel-Gabe (Dreieck: Belebtschlammprobe, Kreis: Klarwasser).

Eine Wechselwirkung durch das Fällmittel  $\text{FeClSO}_4$  und Natrium ist erkennbar (vgl. Anhang 1.2.3). Hier ist eine deutliche lineare Korrelation zwischen Fällmittel-Dosierung und Natrium-Konzentration von  $r^2 = -0,93$  bzw.  $-0,82$  (Ablauf bzw. Belebtschlamm) nachweisbar. Das bedeutet, dass mit zunehmender Fällmittelgabe Natrium-Ionen zunehmend nicht mehr nachweisbar sind. Die in vorliegender Versuchsreihe maximal erreichte rechnerische Eliminationsrate beträgt allerdings lediglich 6,9 %. Es wird daher das Ionengleichgewicht nicht bis zu einer nennenswerten Beeinflussung der Potentialkurven verschoben. Vergleichbar hohe Korrelationen werden bei der Verwendung von PACl offenbar ( $r^2 = -0,99$  bzw.  $-0,75$  für Belebtschlamm bzw. Ablauf). Es scheint daher die Gabe beider Fällmittel mit der Natrium-Konzentration zu korrelieren.

Die Zugabe von Fällmitteln hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Verteilung der weiteren Ionen (vgl. Anhang 1.3). Es dominiert weiterhin der gleiche Wassertyp. Es ist daher nicht zu erwarten, dass durch die Zugabe von Co-Substraten eine relevante Verschiebung der Potentialkurven erfolgt, die eine effektivere Flockungsphase erwarten lassen.

#### 4.1.4 Zusammenfassung und Diskussion

Tabelle 14 stellt die linearen Korrelationskoeffizienten zwischen der Fällmittel-Dosierung und der nachweisebaren Rest-Konzentration zusammen. Rote Felder zeigen eine deutlich negative Korrelation und deuten somit auf eine vorhandene Fällung (oder ggf. erhöhte Fällung hin). So wird deutlich, dass sowohl Gesamt-Phosphor als auch Ortho-Phosphat sehr gut durch Fällung

eliminiert werden können. Überdies kann auch der CSB in einigen Fällen gut reduziert werden, auch wenn hier keine so deutliche Abhängigkeit von der Fällmitteldosierung erkennbar ist. Das liegt in der Eigenschaft des Parameters begründet, da im CSB als Summenparameter viele unterschiedliche Substanzen zusammengefasst werden. Es kann jedoch insbesondere durch eine Nachfällung bei einer stöchiometrischen Überdosierung ( $\beta = 4$  oder größer) eine Reduzierung des CSB von 20 bis über 50 % erreicht werden.

Bezüglich der Entfernung von Spurenstoffen wird offensichtlich, dass nur wenige nennenswert mittels Fällung (einschl. folgender Flockung) aus dem Abwasser entfernt werden können. Substanzen der sorptionsaffinen Stoffgruppen II und IV konnten in diesen Versuchsreihen nur selten nachgewiesen werden, da neben dem Ablauf der Nachklärung (Klarwasser) das feststoffarme Überstandswasser des Belebtschlammes untersucht wurde. Beide Stoffgruppen haben gemein, dass sie üblicherweise in der konventionellen Belebtschlammbehandlung gut bis sehr gut aus dem Abwasser entfernt werden können und daher ohnehin kein deutlich verbesserter Rückhalt infolge Fällung oder Flockung zu erwarten wäre. Gleiches gilt für die sehr gut abbaubaren Substanzen der Stoffgruppe V. Die im Rahmen dieser Versuchsreihen erzielten absoluten Konzentrationsreduzierungen sind im Vergleich zum biologischen Abbau zu vernachlässigen.

Ein weitergehender Rückhalt durch den gezielten Einsatz von Fällmitteln für Substanzen der Stoffgruppen II, IV und V ergänzend zu einer biologischen Behandlung (insbesondere in Kombination mit dem Belebtschlammverfahren als Simultan- oder Nachfällung) ist daher nicht zielführend.

Auf einzelne Substanzen der Stoffgruppe III kann die Verwendung von Fällmitteln allerdings einen positiven Einfluss haben. Tabelle 15 stellt diese Stoffe mit den erreichten Eliminationsraten und den dazugehörigen Dosierungen zusammen. Hierzu zählen **Ciprofloxacin, Diclofenac, Sulfamethoxazol und Glyphosat**. Dieses wird auch ersichtlich in der Zusammenstellung und farblichen Codierung der Eliminationsraten in Abbildung 10

Wie Nam et al. (2014) ausführen, können sich hydrophile Spurenstoffe ( $\log K_{OW} < 1$ ) im Flockungsprozess elektrisch mit  $Al^{3+}$ - oder  $Fe^{+3}$ -Ionen vereinigen. Sulfonamide (hier: Sulfamethoxazol) liegen aufgrund der Säurekonstante (hier:  $pK_a = 5,7$ ) als negative Ionen im neutralen pH-Bereich vor. Die vorliegende Versuchsreihe bestätigt dieses für das Fällmittel  $FeCl_3$ . (Tabelle 15). Dieser Mechanismus ist vermutlich auf weitere Spurenstoffe anwendbar.

Weitere mögliche Ursache einer rechnerischen Elimination in den Fällversuchen könnte eine photolytische Reaktion (Abs. 2.4.1) sein, die bei Sulfamethoxazol (Ryan et al. 2011), Diclofenac (Poirier-Larabie et al. 2016), Ciprofloxacin (Palmisano und Campanella 2015) und Glyphosat (Assalin et al. 2010) beobachtet wurde und in unseren Versuchsreihen nicht ausgeschlossen werden kann.

Abschließend lässt sich feststellen, dass obschon ein spezifischer Einfluss der Fällung auf einzelne Spurenstoffe erkennbar ist, die erreichbaren Eliminationsraten kaum für einen weitgehend vollständigen Rückhalt ausreichen. **Der Ansatz, bestimmte Spurenstoffe (etwa vor dem Hintergrund einer drohenden Überschreitung einer UQN) anhand einer gezielten Fällmittel-Überdosierung aus dem Kläranlagen-Ablauf zu eliminieren, könnte für einzelne Substanzen erfolgreich sein.** Dem stehen allerdings wesentliche wirtschaftliche Aspekte gegenüber. Einerseits sind Kosten für das Fällmittel (als Beispiel: etwa 150 € pro Tonne, Fe-III-Chlorid) anzusetzen. Durch den Einsatz zusätzlicher Fällmittel ist von einer erhöhten Schlammproduktion auszugehen. Der Klärschlamm muss anschließend kostenpflichtig entsorgt werden. Auch können sich zu hohe Fällmittel-Dosierungen negativ auf die Dauerhaftigkeit der Bauwerke, Einbauteile und Sensoren auswirken.

**Tabelle 14: Lineare Korrelationskoeffizienten  $r^2$  für die Korrelation der Fällmitteldosierung mit der nachweisbaren Rest-Konzentration.**

BS = Probe des Überstandswassers von Belebtschlamm. Ab = Klarwasser-Ablauf der Nachklärung. Negative Korrelationskoeffizienten [hier grün dargestellt] deuten auf einen linearen Zusammenhang zwischen Fällmittel-Gabe und Elimination hin.

		FeCl <sub>3</sub>		FeClSO <sub>4</sub>		AlCl <sub>3</sub>		PACl		
		BS	Ab	BS	Ab	BS	Ab	BS	Ab	
<b>Begleitparameter</b>	CSB	-0,67	-0,93	-0,82	-0,83	-0,96	-0,38	-0,02	-0,93	
	Ges. N	0,11	-0,93	-0,80	-0,85	-0,74	-0,44	-0,69	-0,83	
	NH <sub>4</sub> -N	0,51	0,97	0,76	0,76	0,91	0,29	0,46	0,80	
	NO <sub>2</sub> -N	-0,55	-0,81	-0,92	-0,68	-0,05	-0,99	-0,10	-0,38	
	NO <sub>3</sub> -N	-0,11	-0,44	0,78	0,89	0,89	0,40	0,32	0,29	
	Ges. P	-0,91	-0,94	-0,89	-0,96	-0,92	-0,97	-0,96	-0,97	
	Ortho-P	-0,90	-0,92	-0,88	-0,88	-0,87	-0,93	-0,95	-0,97	
<b>Hauptionen</b>	Natrium	0,52	0,63	-0,82	-0,93	-0,03	-0,41	-0,99	-0,75	
	Kalium	0,67	0,44	0,83	-0,90	0,83	-0,60	0,12	0,46	
	Calcium	0,73	-0,15	0,36	-0,95	-0,03	0,87	0,93	-0,52	
	Magnesium	-0,80	-0,64	0,78	0,47	0,58	0,67	0,93	0,24	
	Eisen, ges	0,90	0,80	0,91	0,29	0,97	1,00	-0,61	-0,97	
	Aluminium, ges	-0,77		-0,47	-0,94	0,37	0,87	0,62	0,25	
	Chlorid	1,00	1,00	1,00	-0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	
	Sulfat	0,45	-0,87	0,99	0,86	0,82	0,22	-0,35	-0,81	
<b>Stoffgruppe</b>	<b>I</b>	Carbamazepin	-0,43	0,13	-0,17	-0,21	0,56	-0,89	-0,57	0,43
		Imidacloprid	0,71		0,00	-0,89				
	<b>II</b>	Nickel (Ni)	0,68	1,00	0,12	0,98	-0,07	0,87	-0,29	
		Pyren			1,00					
	<b>III</b>	Ciprofloxacin	-0,92	-1,00	-0,96	-0,97	-1,00	-1,00	-0,95	-0,98
		Diclofenac	-0,95	-0,87	-0,89	0,62	-0,57	-0,94	-0,95	0,40
		Gabapentin	0,76	-0,29	0,35	-0,35		-0,71	-0,29	0,00
		Metoprolol	0,57	0,35	-0,49	0,93	0,85	-0,71	0,00	0,43
		Sulfamethoxazol	-0,97	-0,87	-0,52	0,71	0,80	-0,60	-0,47	-0,09
		Trimethoprim	-0,85	0,35	-0,44	-0,71	0,65	-0,95	-0,65	0,74
		Glyphosat	-0,84	-0,52	-0,81	-0,95	-0,96	-0,93	-0,87	-0,53
		Naphthalin	0,00	0,38	-0,87	0,83	-0,29	-0,69	-0,48	0,63
		Phenanthren			-0,57	0,35	0,45	-0,29	0,89	
		Bisphenol A							0,41	
	Benzotriazol	-0,58		0,29	0,71	-0,41	-0,71	-0,11	0,82	
	<b>V</b>	Coffein	0,00		-0,19	-0,95		0,44	-1,00	-0,57
		Ibuprofen								
Metformin		0,99	-0,71	0,95	0,91	0,87	0,87	0,97	0,88	
Acesulfam-K		0,42	0,30	0,91	0,93	0,52	0,13	0,29	0,83	

**Tabelle 15: Zusammenstellung der infolge Fällmittelgabe erreichbaren Eliminationsraten.**

Hier nur für Stoffe, bei denen ein direkter Zusammenhang naheliegt bzw. zu vermuten ist.

Stoffgruppe	Stoff <sup>1</sup>	Fällmittel	Dosierung	Max. Elim.-rate [%]	Art der Fällung <sup>2</sup>
I	Carbamazepin (log K <sub>ow</sub> = 2,03-2,25)	FeCl <sub>3</sub>	3	15,2	SF
		FeClSO <sub>4</sub>	1	5,5	
		AlCl <sub>3</sub>	3	9,8	
		PACl	3	8,2	
		FeCl <sub>3</sub>	1	5,0	NF
		FeClSO <sub>4</sub>	2	1,9	
		AlCl <sub>3</sub>	3	11,3	
		PACl		< 0	
III	Ciprofloxacin (log K <sub>ow</sub> = 0,28)	FeCl <sub>3</sub>	4	76,5	SF
		FeClSO <sub>4</sub>	3	60,0	
		AlCl <sub>3</sub>	1	61,5	
		PACl	4	67,6	
		FeCl <sub>3</sub>	2	66,7	NF
		FeClSO <sub>4</sub>	3	87,0	
		AlCl <sub>3</sub>	1	62,5	
		PACl	4	75,6	
III	Diclofenac (log K <sub>ow</sub> = 4,02-4,51)	FeCl <sub>3</sub>	4	24,0	SF
		FeClSO <sub>4</sub>	3	20,0	
		AlCl <sub>3</sub>	3	26,3	
		PACl	4	20,0	
		FeCl <sub>3</sub>	2	4,2	NF
		FeClSO <sub>4</sub>	2	6,9	
		AlCl <sub>3</sub>	3	13,0	
		PACl	3	12,5	
III	Sulfamethoxazol (log K <sub>ow</sub> = 0,89)	FeCl <sub>3</sub>	4	13,2	SF
		FeCl <sub>3</sub>	4	18,0	NF
III	Glyphosat (log K <sub>ow</sub> = -3,40)	FeCl <sub>3</sub>	3	86,7	SF
		FeClSO <sub>4</sub>	4	54,0	
		AlCl <sub>3</sub>	4	91,0	
		PACl	3	61,4	
		FeCl <sub>3</sub>	3	82,0	NF
		FeClSO <sub>4</sub>	3	73,1	
		AlCl <sub>3</sub>	3	94,1	
		PACl	4	35,4	

<sup>1</sup> Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten nach Anhang 1 des Berichts zur 1. Projektphase (dort mit weiteren Nachweisen). <sup>2</sup> Art der Fällung: SF = Simultanfällung; NF = Nachfällung.

Ableitung von Kennwerten zur Quantifizierung der Herkunft, der Ausbreitung und des Rückhaltes

Typ	ID-ges	BEGLEITPARAMETER						HAUPTIONEN						SM	ARZNEISTOFFE						PFLANZENSCHUTZMITTEL						SONSTIGE						
		CSB	Ges. N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N	Ges. P	Ortho-P	Natrium	Kalium	Calcium	Magnesium	Chlorid		Sulfat	Nickel (Ni)	Carbamazepin	Ciprofloxacilin	Coffein	Diclofenac	Gabapentin	Mefenbrin	Metoprolol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Glyphosat	Imidacloprid	Naphthalin	Phenanthren	Acesulfam-K	Benzotriazol		
BS	FM-1-2-191024	-5,1	-6,8	0,7	-1,9	1,7	54,1	59,3	1,0	-4,3	2,3	5,7	-26,6	-0,3	0,0	11,9	47,1	33,3	8,0	7,1	-11,1	-3,7	5,7	2,9	-19,4	0,0	50,0	0,0	5,3	0,0	-5,3	9,1	
	FM-1-3-191024	25,7	-0,5	4,9	3,6	0,0	79,1	86,7	1,2	-7,1	1,3	8,1	-47,7	-0,5	-225,0	3,4	58,8	12,0	0,0	-15,6	-7,4	5,7	8,6	81,1	0,0	50,0	0,0	-21,1	0,0	-21,1	0,0		
	FM-1-4-191024	9,4	-7,8	-0,7	-0,0	82,7	95,0	1,5	-7,9	-0,4	10,5	-69,8	-0,3	0,0	15,3	70,6	33,3	12,0	-7,1	-31,1	-7,4	11,3	5,7	86,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-21,1	9,1	0,0	0,0	
	FM-1-5-191024	20,3	-0,9	-4,9	4,1	1,1	94,0	98,0	-4,0	-4,7	-7,4	7,6	-95,0	-0,3	-362,5	6,8	76,5	0,0	24,0	-7,1	-37,8	0,0	3,4	8,6	85,9	-33,3	0,0	0,0	-5,3	9,1	0,0	0,0	
AB	FM-1-7-191024	28,6	3,2	-0,9	0,0	1,6	47,1	53,7	3,0	-5,3	6,3	6,5	-26,1	0,3	-66,7	5,0	33,3	0,0	0,0	5,3	0,0	3,4	9,8	2,9	-47,9	0,0	50,0	0,0	0,0	-5,3	0,0	0,0	
	FM-1-8-191024	30,7	4,4	-1,5	2,1	1,1	72,8	83,6	-2,9	-5,6	2,7	4,9	-48,5	0,3	-166,7	1,7	66,7	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	4,9	0,0	53,0	0,0	-50,0	0,0	-6,3	0,0	-6,3	0,0	
	FM-1-9-191024	41,7	4,0	-1,8	3,4	0,0	92,6	97,8	-1,0	-4,9	5,2	7,0	-70,9	0,3	-233,3	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	0,0	82,0	0,0	-50,0	0,0	-12,7	0,0	-12,7	0,0
	FM-1-10-191024	47,3	6,8	-2,1	2,1	2,1	94,1	99,3	-2,9	-3,4	1,8	5,4	-95,3	0,8	-300,0	1,7	0,0	0,0	4,2	5,3	7,7	0,0	18,0	0,0	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,2	0,0	-3,2
BS	FM-2-2-191029	6,7	11,2	-7,8	20,4	1,8	56,7	63,9	3,8	-6,7	2,5	-0,6	-8,5	-70,6	25,0	5,6	25,0	20,0	0,0	7,1	-13,0	11,5	16,4	7,3	26,1	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	-10,0	-10,0	
	FM-2-3-191029	0,8	7,8	-10,4	30,8	-0,9	77,6	85,0	6,7	-5,5	3,6	-1,2	-14,2	-104,3	25,0	-11,1	45,0	40,0	13,3	0,0	-34,8	3,8	3,0	0,0	50,9	-16,7	33,3	40,0	-30,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	FM-2-4-191029	9,9	9,1	-8,5	34,3	-0,9	87,0	93,0	11,0	-5,9	4,0	-1,2	-20,8	-153,7	-12,5	1,9	60,0	0,0	20,0	0,0	-34,8	11,5	13,4	9,8	30,4	0,0	33,3	40,0	-30,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	FM-2-5-191029	13,8	15,5	-9,8	36,4	-2,7	88,2	96,2	7,1	-9,4	-4,9	-10,2	-26,4	-194,1	12,5	5,6	60,0	20,0	16,7	0,0	-43,5	7,7	13,4	4,9	54,0	0,0	33,3	20,0	-35,0	-10,0	0,0	0,0	0,0
AB	FM-2-7-191029	53,8	7,6	-2,9	2,5	-1,7	40,7	67,5	-1,5	5,6	0,0	-2,4	-9,5	-78,9	-100,0	-5,7	47,8	0,0	3,4	0,0	-71,1	0,0	11,3	0,0	19,8	14,3	-100,0	0,0	-50,0	0,0	-50,0	0,0	
	FM-2-8-191029	48,3	9,8	-4,2	0,4	-5,1	41,4	87,1	2,1	4,4	2,0	-2,9	-11,3	-58,6	-133,3	1,9	69,6	16,7	6,9	0,0	-104,4	-8,0	-11,3	7,0	46,4	14,3	-100,0	0,0	-60,5	0,0	-60,5	0,0	
	FM-2-9-191029	59,4	8,0	-5,6	4,2	-5,1	81,9	98,2	4,8	9,1	6,4	-1,2	-20,3	-77,2	-166,7	-1,9	87,0	33,3	-6,9	7,1	-122,2	-12,0	-40,8	4,7	73,1	14,3	-300,0	-33,3	-68,4	0,0	-68,4	0,0	
	FM-2-10-191029	65,7	12,0	-3,6	3,0	-5,1	89,1	99,7	6,9	9,5	8,0	-2,4	-8,5	-46,8	-233,3	0,0	33,3	-6,9	0,0	-122,2	-28,0	-18,3	-4,7	65,5	28,6	-200,0	0,0	-86,8	-10,0	-86,8	-10,0		
BS	FM-3-2-191105	24,8	20,7	-12,5	5,6	-0,9	55,8	69,0	1,5	1,4	1,3	0,0	-29,3	-2,3	-262,5	-2,0	61,5	0,0	21,1	0,0	0,0	-5,3	-1,5	0,0	33,8	0,0	33,3	0,0	17,6	-2,4	17,6	-2,4	
	FM-3-3-191105	23,8	17,8	-6,2	15,2	-3,0	72,9	86,6	3,9	0,5	5,9	1,3	-46,5	-2,6	50,0	9,8	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	-5,3	-1,5	0,0	33,8	0,0	33,3	0,0	17,6	-2,4	17,6	-2,4	
	FM-3-4-191105	39,3	19,5	-29,2	12,8	-3,0	88,5	95,7	1,4	-3,8	4,0	0,0	-68,2	-3,7	50,0	2,0	0,0	0,0	2,6	0,0	-38,9	-10,5	-7,6	0,0	51,7	0,0	0,0	-33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
	FM-3-5-191105	50,5	21,9	-50,0	-2,4	-3,0	92,0	98,2	0,2	-4,3	-1,0	-2,5	-91,1	-2,8	-125,0	-25,5	0,0	0,0	10,5	0,0	-41,7	-36,8	-28,8	-26,5	91,0	0,0	33,3	0,0	-11,8	0,0	-11,8	0,0	
AB	FM-3-7-191105	25,1	6,5	-3,9	4,2	0,7	23,1	47,5	2,0	3,7	0,8	1,3	-19,9	-1,3	0,0	7,5	62,5	-25,0	0,0	0,0	0,0	15,4	9,5	5,1	12,6	0,0	50,0	0,0	-23,1	0,0	-23,1	0,0	
	FM-3-8-191105	45,8	2,8	17,1	8,5	-2,1	61,5	80,9	1,0	5,0	-3,8	-1,9	-39,2	-1,3	0,0	9,4	50,0	8,7	0,0	-10,3	15,4	6,8	7,7	94,1	0,0	33,3	0,0	33,3	-17,9	0,0	33,3	-17,9	
	FM-3-9-191105	2,7	4,5	5,9	14,5	-0,7	83,0	99,8	2,8	6,4	-2,7	-0,6	-58,5	-1,1	0,0	11,3	0,0	13,0	14,3	-5,9	15,4	2,7	7,7	7,7	45,8	0,0	33,3	0,0	33,3	-5,1	0,0	33,3	-5,1
	FM-3-10-191105	55,3	4,3	-16,1	15,8	-0,7	88,4	98,1	1,0	3,2	-5,3	-1,9	-77,8	-0,5	0,0	11,3	0,0	13,0	14,3	-5,9	15,4	2,7	7,7	7,7	45,8	0,0	33,3	0,0	33,3	-5,1	0,0	33,3	-5,1
BS	FM-4-2-191105	-5,9	60,5	16,7	26,7	-0,9	37,4	41,4	2,8	3,6	0,1	0,6	-12,9	0,0	-171,4	1,4	23,5	25,0	0,0	3,0	-12,7	6,3	7,8	5,9	11,8	0,0	33,3	-50,0	0,0	-4,3	0,0	-4,3	0,0
	FM-4-3-191105	16,2	61,6	-52,8	4,8	1,8	71,4	78,4	4,6	2,4	-0,4	-1,1	-24,8	0,0	-114,3	0,0	55,9	50,0	12,0	3,0	-18,2	6,3	9,1	11,8	59,5	0,0	66,7	-50,0	-9,1	-6,4	-9,1	-6,4	
	FM-4-4-191105	-31,4	62,1	-52,8	0,0	1,8	82,6	92,0	7,3	0,0	-1,1	-1,7	-36,6	1,0	-114,3	8,2	61,8	12,0	0,0	-20,0	6,3	5,2	7,8	61,4	0,0	66,7	-50,0	-9,1	-4,3	-9,1	-4,3	-9,1	-4,3
	FM-4-5-191105	13,9	58,7	-11,1	17,1	-3,5	91,4	97,2	8,3	1,2	-2,3	-2,8	-51,5	0,0	57,1	2,7	67,6	20,0	3,0	-30,9	0,0	6,5	7,8	56,2	0,0	33,3	-100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
AB	FM-4-7-191105	35,7	14,5	-9,7	1,9	0,0	37,6	42,1	0,7	-1,2	2,3	0,0	-12,6	-0,3	-10,9	30,3	12,5	8,3	0,0	0,0	6,1	1,5	4,0	-35,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-13,3	-6,9	-13,3	-6,9	
	FM-4-8-191105	41,6	14,5	-11,0	3,4	-0,9	62,9	66,3	-0,2	-2,0	1,2	-1,7	-23,3	1,0	-3,1	48,5	12,5	4,2	6,1	0,0	0,0	-4,5	-2,0	-14,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-6,7	-3,4	-6,7	-3,4	
	FM-4-9-191105	56,4	17,3	-10,3	1,1	-0,9	86,3	89,7	1,3	-0,4	2,5	0,0	-36,9	0,5	-1,6	57,6	0,0	12,5	0,0	12,5	0,0	-9,1	-3,0	-12,1	-6,0	-17,0	0,0	-800,0	0,0	-13,3	-9,2	-13,3	-9,2
	FM-4-10-191105	58,9	17,9	-12,1	1,9	0,0	91,6	95,7	1,5	-1,6	1,5	-0,6	-49,5	1,3	-12,5	75,8	25,0	-16,7	0,0	-18,2	0,0	0,0	-4,0	35,4	0,0	-300,0	0,0	-20,0	-9,2	-20,0	-9,2	-20,0	-9,2

Legende:  
< -100,0    0,0    100,0

**Abbildung 10: Eliminationsraten der Fällversuche.**  
 Farblich codiert (negative Eliminationsraten: rot; positive: grün). Für fehlender Parameter keine Daten.  
 Analyseergebnisse s. Anhang 1.1.

## 4.2 Einfluss der Co-Substrat-Gabe

Co-Substrate (z. B. Methanol, Essigsäure) werden bei einem Mangel leicht abbaubarer organischer Verbindungen zur biologischen Stufe gegeben, um möglichst eine vollständige Denitrifikation zu erreichen. Es besteht die Möglichkeit, dass sich diese Co-Substrate mittels Wasserstoff-Brückenbindungen (temporär) an die Spurenstoff-Moleküle binden (Margot et al. 2015). Bei der Analyse mittels LCMS- oder GCMS-Verfahren werden diese Spurenstoffe dann möglicherweise nicht detektiert. Die Folge wäre eine Unterschätzung tatsächlicher Konzentrationen. Da die Wasserstoff-Brückenbindungen sich wieder lösen können und damit die Detektion folgerichtig wieder möglich ist, könnte dieser Prozess ursächlich für den Anstieg einiger Spurenstoff-Frachten im Verlauf der Abwasserreinigung sein. Ziel der Versuchsreihen war es, diesen Einfluss für die in dieser Studie berücksichtigten Parameter und Spurenstoffe zu erkennen und möglichst zu quantifizieren (vgl. Abs. 3.1.2). Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in **Anhang 2** zusammengefasst.

### 4.2.1 Einfluss auf Nähr- und Zehrstoffe

Wenn dem Belebtschlamm Essigsäure zugesetzt wurde, stieg die rechnerische Eliminationsrate des **Gesamt-Stickstoffs TN** bei  $\beta = 8$  auf 23,5 %. Dieses ist aber vermutlich auf eine in der Folge der Co-Substrat-Gabe aktivierten Denitrifikation zurückzuführen, wie es aufgrund der entsprechend reduzierten Nitrat-Konzentrationen zu vermuten ist. In anderen Dosierungen betragen die Veränderungen weniger als 10 %. Es wird daher nicht von einem analytischen Problem ausgegangen. Ebenso wenig zeigt sich ein Problem durch die Gabe von Methanol.

Die rechnerische Eliminationsrate von **Ammonium-Stickstoff NH<sub>4</sub>-N** aus Belebtschlamm schwankte zwischen 1,2 und 3,5 % bei einer Dosierung von Methanol zwischen  $\beta = 4$  und 16. Die Eliminationsrate von NH<sub>4</sub>-N aus dem Schlamm stieg bei einer Essigsäure-Dosierung von  $\beta = 4$  auf 3,0 %, nahm dann ab und stieg schließlich wieder auf 24,9 % bei  $\beta = 16$ . Letzterer Wert ist als Ausreißer zu betrachten, da er um mehr als 20 % von den ansonsten nahezu konstanten Konzentrationen der Messreihe abweicht (vgl. hierzu Anhang 2.2.1). Es ist daher nicht von einem analytischen Problem bei der Analyse von NH<sub>4</sub> nach Co-Substrat-Gabe auszugehen.

Durch Methanol wird **Nitrat** nicht beeinflusst (max. Eliminationsraten 5 %). Die Ergebnisse für Methanol zeigen auch, dass während der Versuchsdurchführung die Denitrifikation erfolgreich unterbunden werden konnte. Dieses kann für die Versuchsreihe mit Essigsäure nicht ausgeschlossen werden. Hier ergaben sich Eliminationsraten von z.T. mehr als 80 %. Dieses ist mehr auf eine Denitrifikation als auf ein analytisches Problem zurückzuführen.

Die Verwendung der Co-Substrate (Essigsäure und Methanol) zeigt direkten Einfluss auf die festgestellten **CSB-Konzentrationen**, da beide Substrate direkt als CSB „mitgemessen“ werden (vgl. Anhang 2.2.1). Da beide Zusammenhänge aber eine sehr hohe Korrelation aufweisen (für Methanol:  $r^2 = -0,99$ ; für Essigsäure:  $r^2 = -0,95$ ) ist von keiner Beeinflussung der Genauigkeit auszugehen.

Die Zugabe von Essigsäure hat nur geringen Einfluss auf die festgestellten **Gesamt-Phosphat-Konzentrationen** (Anhang 2.2.1). Die Dosierung von Methanol korreliert hingegen stark linear mit der Eliminationsrate von Gesamt-Phosphor ( $r^2 = -0,97$ ). Da keine offensichtlichen biochemischen Prozesse im Belebtschlamm vorhanden sind, die hier zum Tragen kommen könnten<sup>5</sup>, ist von einem **analytischen Problem** infolge der Bildung von Wasserstoff-Brückenbindungen bei der photometrischen Bestimmung nach Aufschluss von Gesamt-Phosphor auszugehen. In

<sup>5</sup> Für die Proben aus der Denitrifikationszone kann hier eine biologische Phosphor-Konzentration ausgeschlossen werden, da das Milieu am Probenahmeort sicher anoxisch (nicht anaerob) war. Zudem würde ein anaerobes Milieu zunächst die Freisetzung von P zur Folge haben und stünde somit im Gegensatz zu den Beobachtungen in dieser Versuchsreihe.

diesem Fall würde die Zugabe von Methanol zu einer Unterschätzung der tatsächlichen P-Konzentrationen (um bis zu 10 %) führen.

Die Verwendung von Essigsäure zeigt keinen Einfluss auf die bestimmten **ortho-Phosphat**-Konzentrationen. Die Eliminationsraten bei der Gabe von Methanol sind relativ konstant bei 4,4 bis 5,7 %. Ähnlich wie beim Gesamt-Phosphat, scheint hier ein analytisches Problem bei Zugabe von Methanol vorzuliegen, auch wenn kein linearer Trend erkennbar ist ( $r^2 = 0,55$ ). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zur Bestimmung von Gesamt-Phosphor, zunächst alle Poly-Phosphate chemisch aufgeschlossen werden. Die daraus resultierenden ortho-Phosphate werden identisch mit einer alleinigen Bestimmung der ortho-Phosphate analysiert (Phosphationen reagieren in saurer Lösung mit Molybdat- und Antimon-Ionen zu einem Antimonylphosphormolybdat-Komplex, der durch Ascorbinsäure zu Phosphormolybdänblau reduziert wird).

#### 4.2.2 Einfluss auf Spurenstoffe

Auf die Vertreter der **Stoffgruppe I** (hier liegen nur Daten für **Carbamazepin** und **Imidacloprid** vor) zeigt die Gabe von Co-Substraten geringen Einfluss. Allein für Imidacloprid ist eine negative Korrelation zwischen Co-Substrat-Gabe und rechnerischer Eliminationsrate nachweisbar ( $r^2 = 0,77$ ). Ein nennenswerter oder gar systematischer Einfluss auf die nachweisbaren Stoffkonzentrationen (0,02 bis 0,05 µg/L) im unteren Bereich des Analysebereichs (Bestimmungsgrenze: 0,02 µg/L) ist allerdings nicht erkennbar (vgl. Anhang 2.2.4).

Für Vertreter der **Stoffgruppen II und IV** konnten ebenfalls kaum Daten erhoben werden (Stoffkonzentrationen unter Bestimmungsgrenze). Da in dieser Versuchsreihe nur das Überstandswasser des Belebtschlammes (nach Sedimentation) untersucht wurde (vgl. Abs. 3.1.2), wäre zu vermuten, dass die sorptionsaffinen Substanzen dieser Stoffgruppen aus diesem Grund kaum nachweisbar sind. Ähnliches wurde bei den Versuchsreihen zum Einfluss der Fällmittelgabe beobachtet (vgl. Abs. 4.1.2).

Für **Nickel** zeigt sich jedoch eine deutlich, negative Korrelation zwischen der Stoffkonzentration und der Co-Substrat-Dosierung ( $r^2 = -0,97$  für Methanol; der Wert für Essigsäure ist aufgrund eines offensichtlichen Messfehlers bei  $\beta = 2$  [vgl. Anhang 2.2.4] nicht aussagekräftig). Dieses deutet auf ein analytisches Problem vermutlich infolge konjugierter Systeme hin. Die Nickelkonzentration wurde somit in unseren Versuchsreihen bei der Gabe von Methanol ( $\beta = 4$ ) um bis zu 62,5 % unterschätzt. Ein gleicher Trend ist für die Verwendung von Essigsäure erkennbar.

Ein spezifischer Einfluss der Gabe von Co-Substraten auf die analytische Genauigkeit von Vertretern der gut bzw. sehr gut biologisch abbaubaren **Stoffgruppe V** ist für einzelne Substanzen wahrscheinlich. So korrelieren die festgestellten Konzentrationen sehr gut mit den Dosierungen bei **Coffein** ( $r^2 = 0,93$  bzw. 0,95 für Methanol bzw. Essigsäure) und **Metformin** ( $r^2 = 0,95$  bzw. 0,90 für Methanol bzw. Essigsäure). Bei **Ibuprofen** und **Acesulfam-K** sind die Korrelationskoeffizienten ähnlich hoch. Die festgestellten Konzentrationen nehmen daher linear mit der Gabe der Co-Substrate zu. Dieses könnte auf ein systematisches analytisches Problem hindeuten, wenn z. B. Wasserstoff-Brückenbindungen in der Folge der Co-Substrat-Gabe gelöst werden und die Substanz nachweisbar wird<sup>6</sup>.

In der **Stoffgruppe III** konnte kein systematischer Einfluss der Co-Substrat-Gabe auf viele Substanzen (**Ciprofloxacin**, **Diclofenac**, **Trimethoprim**, **Naphthalin**, **Phenanthren**, **Benzo-triazol**) beobachtet werden.

Auffällig positive lineare Korrelationen, die zu negativen Eliminationsraten (d.h. zu einer rechnerischen Zunahme der Konzentrationen) führen, wurden für zahlreiche Kombinationen festgestellt. So wurde für **Gabapentin** eine Korrelation bei Essigsäure ( $r^2 = 0,88$ ) festgestellt,

<sup>6</sup> Vgl. hierzu die Ausführungen zu konjugierten System im Abs. 3.4.2 des Vollberichts der 1. Projektphase.

die zu einer konstanten Eliminationsrate von mehr als -6 % führte. In diesem Fall kann eine fehlerhafte Nullprobe ursächlich sein. Die Gabe von Methanol führt bei **Metoprolol** zu Eliminationsraten von -16,7 bis -33,3 % bei hoher Korrelation ( $r^2 = 0,76$ ). Die Verwendung von Essigsäure ist für die Bestimmung dieses Stoffes jedoch vergleichsweise unbedeutend. Ein deutlicher Einfluss macht sich bei der Verwendung beider Co-Substrate bei der Analyse von **Sulfamethoxazol** bemerkbar ( $r^2 = 0,75$  bzw.  $0,74$  für Methanol bzw. Essigsäure). In beiden Fällen führt das zu hohen negativen Eliminationsraten von -10 bis -47 %. Für die genannten Kombinationen wird mithin die tatsächliche Stoff-Konzentration im Regelfall unterschätzt. Erst bei Zugabe eines (geeigneten) Co-Substrats werden die Stoffe nachweisbar (s. hierzu die Zusammenfassung und Diskussion am Ende dieses Abschnitts in Abs. 4.2.4).

### 4.2.3 Einfluss auf die Verteilung der Haptionen und Ionenbilanz

Analytisch weist die Gabe von Co-Substraten auf die Bestimmung der Haptionen einige Auffälligkeiten auf (vgl. Anhang 2.2.3). Für viele Haptionen liegt eine ausgeprägte negative Korrelation bei Gabe von Methanol vor. Die tatsächlichen Stoffkonzentrationen werden dadurch unterschätzt (bis zu 46,2 % bei Eisen, 60 % bei Aluminium und maximal 11 % bei Natrium, Kalium und Magnesium). Die Verwendung von Essigsäure führt hingegen zu einer häufig positiven Korrelation mit der Folge negativer Eliminationsraten (bis zu etwa 5 % bei Natrium, Calcium und Magnesium). Die Ursachen hierfür liegen vermutlich in einer Änderung der Bindungsform und einem daraus folgendem, geänderten Sorptionsverhalten, das zu einer veränderten Verteilung der gelösten und adsorbierten Anteile führt.

### 4.2.4 Zusammenfassung und Diskussion

In Tabelle 16 sind die linearen Korrelationskoeffizienten für einen linearen Zusammenhang zwischen der Co-Substrat-Dosierung und der Eliminationsrate zusammengestellt. Hohe negative Korrelationsraten zeigen an, dass der entsprechende Stoff eliminiert wird bzw. dass die nachweisbare Stoffkonzentration sinkt (z. B. Gesamt-Phosphor mit  $r^2 = -0,97$  bei Methanol). Hohe positive Korrelationskoeffizienten zeigen an, dass die Stoffkonzentration linear mit der Gabe von Co-Substraten zunimmt. Deutlich wird das z. B. beim CSB, da die Co-Substrate direkt mitgemessen werden.

Entscheidend neben diesen linearen (oder ggf. nichtlinearen, hier nicht untersuchten) Abhängigkeiten ist dann, in welcher Größenordnung die Beeinflussung der festgestellten Stoffkonzentrationen erfolgt. Tabelle 17 fasst die relevanten Abhängigkeiten (Betrag von  $r^2 \geq 0,75$ ) zusammen und stellt die Eliminationsraten für die maximale Co-Substrat-Gabe ( $\beta = 4$ )<sup>7</sup> daneben.

Die sehr gut biologisch abbaubaren Substanzen der **Stoffgruppe V** haben gemein, dass sie in allen Kombinationen relevante negative Eliminationsraten, d.h. zunehmende Konzentrationen, aufweisen. In dieser Versuchsreihe wurde Belebtschlamm verwendet, der reich an Nitrat war (etwa 9 bis 10 mg N/L, vgl. Anhang 2). Die Proben wurden der Nitrifikationszone entnommen (vgl. Abs. 3.1.2). Die Sauerstoffkonzentrationen, die nach der Reaktions- und Sedimentationsphase gemessen wurden (vgl. Abbildung 4), lag über 3 mg O<sub>2</sub>/L (Versuchsreihen mit Methanol) bzw. zwischen 0,2 bis 1,9 mg O<sub>2</sub>/L (Essigsäure). Es bestanden somit zu keinem Zeitpunkt anoxische oder anaerobe Versuchsbedingungen. Denitrifizierende Prozesse können daher ausgeschlossen werden.

Prinzipiell stehen die sehr gut biologisch abbaubaren Vertreter der Stoffgruppe V auch als Substrat während der Denitrifikation zur Verfügung. Da eine Denitrifikation ausgeschlossen

<sup>7</sup> Diese Co-Substrat-Gabe ist geeignet, die Denitrifikation von  $4 \times 3 = 12$  mg N/L zu ermöglichen (vgl. Abs. 3.1.2).

werden kann, kommt es ggf. zu aeroben Stoffwechselforgängen, die zuerst die leichter verfügbaren Co-Substrate (Methanol und Essigsäure) umsetzen. Die (etwas) schlechter umsetzbaren Spurenstoffe der Stoffgruppe V werden daher mit zunehmender Co-Substrat-Gabe stetig weniger abgebaut. Gegenüber dem Nulltest äußert sich das in negativen Eliminationsraten, da folglich die Rest-Konzentration zunimmt. Es kann daher aus dieser Versuchsreihe nicht auf eine analytische Beeinflussung der gut biologisch abbaubaren Stoffgruppe V geschlossen werden.

**Tabelle 16: Lineare Korrelationskoeffizienten  $r^2$  für die Korrelation der Co-Substrat-Dosierung mit der nachweisbaren Rest-Konzentration.**

BS = Probe des Überstandswassers von Belebtschlamm. Hohe Korrelationskoeffizienten deuten auf einen linearen Zusammenhang zwischen Fällmittel-Gabe und Eliminationsrate hin.

		Meth.	Essigs.	
		BS	BS	
<b>Begleitparameter</b>	CSB	0,99	0,95	
	Ges. N	0,14	-0,33	
	NH <sub>4</sub> -N	-0,61	-0,60	
	NO <sub>2</sub> -N	-0,70	-0,41	
	NO <sub>3</sub> -N	0,32	-0,21	
	Ges. P	-0,97	0,69	
	Ortho-P	-0,55	0,02	
<b>Hauptionen</b>	Natrium	-0,84	0,85	
	Kalium	-0,99	0,50	
	Calcium	0,95	0,79	
	Magnesium	-0,71	0,83	
	Eisen, ges	-0,88	0,60	
	Aluminium, ges	-0,91	-0,73	
	Chlorid		0,35	
	Sulfat	0,73	-0,26	
<b>Stoffgruppe</b>	<b>I</b>	Carbamazepin	-0,07	-0,24
		Imidacloprid	-0,77	0,00
	<b>II</b>	Nickel (Ni)	-0,97	-0,15
	<b>III</b>	Ciprofloxacin	0,36	-0,67
		Diclofenac	-0,29	0,21
		Gabapentin	0,35	0,88
		Metoprolol	0,76	0,24
		Sulfamethoxazol	0,75	0,74
		Trimethoprim	0,00	-0,50
		Glyphosat	-0,45	-0,89
		Naphthalin	0,26	-0,35
		Phenanthren		0,45
		Benzotriazol	0,33	-0,87
	<b>V</b>	Coffein	0,93	0,95
		Ibuprofen	0,82	0,83
Metformin		0,95	0,90	
Acesulfam-K		0,83	0,74	

Für die in Tabelle 17 berücksichtigten Vertreter der **Stoffgruppen III (Gabapentin, Metoprolol, Sulfamethoxazol)** kann dieser Mechanismus ebenso gelten. Dieses gilt umso mehr, als dass sich die biologische Abbaubarkeit dieser Stoffe nicht zwangsläufig deutlich von Vertretern der Stoffgruppe V unterscheidet (s. hier Abs. 4.4, s. a. Abbildung 34 und Abbildung 35 in Abs. 5.1). Die Verwendung von Essigsäure führt bei weiteren Substanzen der Stoffgruppe III (**Glyphosat** und **Benzotriazol**) zu einer Elimination von 63,2 bzw. 9,0 %. Insbesondere für das relativ schlechter abbaubare Glyphosat (s. Abs. 4.4) ist daher von einem analytischen Problem, ggf. in Form einer Wasserstoff-Brückenbindung, auszugehen, welches zu Minderbefunden

führt. Dieses wird auch sichtbar, wenn die Eliminationsraten zusammengestellt und farblich codiert werden (Abbildung 11). Dieses Phänomen wurde bereits mehrfach bei Glyphosat beobachtet (Piccolo und Celano 1994; Miano et al. 1992). Während der Dissoziation von Säuregruppen während laufend Protonen abgegeben und aufgenommen, was schließlich zu Wasserstoff-Brückenbindungen führen kann.

Für **Nickel** ist vermutlich einer Änderung der Bindungsform, so z. B. die wasserlöslichen Konjugate Nickelcarbonat (NiCO<sub>3</sub>) oder Nickelchlorid (NiCl<sub>2</sub>), ursächlich für einen hohen linearen Zusammenhang zwischen Co-Substrat-Gabe und Stoffkonzentration. Die festgestellten Eliminationsraten von 32,5 bzw. 50,0 % (für Methanol bzw. Essigsäure) zeigen an, dass im Überstandswasser (wässrige Phase des Belebtschlamm), das hier analysiert wurde (vgl. Abs. 3.1.2 und sinngemäß Abbildung 4) weniger Nickel vorhanden ist. Da eine biochemische Umsetzung sicher auszuschließen ist, wäre davon auszugehen, dass infolge der Co-Substrat-Gabe sich einige der o.g. wasserlöslichen Konjugate lösen und Nickel nunmehr in einer sorptionsaffinen Form vorliegt, die während der Sedimentationsphase im Belebtschlamm verbleibt und daher nicht detektiert wird. Diese Beobachtung spricht dafür, dass die Verwendung von Co-Substrat einen deutlichen Einfluss auf die Nachweisbarkeit von Nickel (je nach Medium, Probenahme und Art der Versuchsdurchführung) haben kann.

Für die Vertreter der Hauptionen ist ein ähnliches Verhalten zu beobachten. Es wäre hier im Einzelfall zu prüfen, in welcher Bindungsform diese vorliegen können. Das ist jedoch Gegenstand dieser Studie.

**Tabelle 17: Zusammenstellung der analytisch auffälligen Stoffe bei Gabe von Co-Substraten und maximale Eliminationsraten.**

Berücksichtigt sind Kombinationen mit einem Korrelationskoeffizienten (Betrag) von  $r^2 \geq 0,75$  (vgl. Tabelle 16). Eine negative Korrelation deutet darauf hin, dass die tatsächlichen Stoffkonzentrationen analytisch unterschätzt werden (und umgekehrt). Angegeben sind die in den Versuchsreihen festgestellten Eliminationsraten für maximale Co-substrat-Gabe ( $\beta = 4$ ).

		<b>Methanol</b>	<b>Essigsäure</b>
	<b>CSB</b> <sup>1</sup>	positiv (-241 %)	positiv (-102 %)
	<b>Ges. P</b>	negativ (4,6 %)	
	<b>Natrium</b>	negativ (8,2 %)	positiv (-4,9 %)
	<b>Kalium</b>	negativ (11,6 %)	positiv (-1,2 %)
	<b>Calcium</b>	positiv (-8,8 %)	positiv (-4,9 %)
	<b>Magnesium</b>	negativ (1,3 %)	positiv (-5,2 %)
	<b>Eisen, ges</b>	negativ (46,2 %)	
	<b>Aluminium, ges</b>	negativ (60,0 %)	negativ (26,7 %)
<b>II</b>	<b>Nickel</b>	negativ (62,5 %)	negativ (50,0 %)
<b>III</b>	<b>Gabapentin</b>		positiv (-6,7 %)
	<b>Metoprolol</b>	positiv (-33,3 %)	
	<b>Sulfamethaxazol</b>	positiv (-47,4 %)	positiv (-18,4 %)
	<b>Glyphosat</b>		negativ (63,2 %)
<b>V</b>	<b>Coffein</b>	positiv (-127 %)	positiv (-533 %)
	<b>Ibuprofen</b>	positiv (-64,6 %)	positiv (< -1260 %) <sup>2</sup>
	<b>Metformin</b>	positiv (-61,5 %)	positiv (-313 %)
	<b>Acesulfam-K</b>	positiv (-10,5 %)	positiv (-31,1 %)
<sup>1</sup> Die Co-Substrate werden direkt als CSB mitgemessen <sup>2</sup> Max. Eliminationrate bezogen auf Bestimmungsgrenze, da Stoff in Nullprobe nicht nachweisbar.			

Typ	ID-ges	BEGLEITPARAMETER						HAUPTIONEN						SM	ARZNEISTOFFE										PFLANZENSCHUTZMITTEL				SONSTIGE				
		CSB	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P	Ortho-P	Natrium	Kalium	Calcium	Magnesium	Chlorid		Sulfat	Nickel (Ni)	Carbamazepin	Ciprofloxacin	Coffein	Diclofenac	Gabapentin	Mefenbram	Metoprolol	Sulfamethoxazol	Trimethoprim	Glyphosat	Imidacloprid	Naphthalin	Phenanthren	Acetylcholin	Benzotriazol		
Methanol	CS-1-2-191121	-42,5	-5,7	1,1	51,8	3,4	5,1	5,7	-0,9	3,6	-2,4	1,3	0,0	0,0	12,5	1,9	-8,3	7,6	4,8	4,5	7,7	-20,8	-28,9	2,4	10,5	-5,0				0,0	0,0	3,3	
	CS-1-3-191121	-89,6	-7,2	2,3	50,8	1,6	6,3	4,4	-0,9	6,2	-6,8	0,6	0,0	0,0	37,5	-7,5	-16,7	-22,7	0,0	0,0	-23,1	-29,2	-47,4	-2,4	-3,2	-5,0				0,0	0,0	5,5	
	CS-1-4-191121	-157,5	-2,1	0,0	50,8	0,2	9,9	4,6	3,6	10,7	-9,2	1,3	0,0	-0,5	37,5	3,8	-5,6	-66,7	0,0	0,0	-46,2	-16,7	-26,3	7,3	-1,6	-5,0				0,0	0,0	-13,2	
Essigsäure	CS-1-5-191121	-241,2	-3,1	3,4	50,8	0,1	10,8	4,4	8,2	11,6	-8,8	1,3	0,0	-10,4	62,5	0,0	-8,3	-127,3	4,8	0,0	-61,5	-33,3	-47,4	-2,4	20,2	0,0				0,0	0,0	0,0	
	CS-2-2-191126	-12,8	6,1	3,0	16,9	25,4	2,3	3,2	1,9	0,0	3,5	1,9	0,3	16,7	-8,1	-3,0	-22,2	4,5	-3,3	-162,1	-9,1	-10,5	-6,1	30,9	20,0	-50,0	33,3	-24,4	0,0	0,0	-10,5	0,0	
	CS-2-3-191126	-29,0	23,5	2,1	92,4	82,3	-3,9	-0,4	-1,9	1,6	-2,6	-2,6	0,0	0,3	-250,0	3,2	6,1	-433,3	13,6	-6,7	-279,3	-3,0	0,0	3,0	55,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-33,3	0,0
Methanol	CS-2-4-191126	-94,2	9,1	-4,0	18,0	27,4	-1,2	0,4	-5,8	-3,3	-6,1	-7,1	0,0	-0,5	33,3	-1,6	0,0	-466,7	-4,5	-6,7	-244,8	-9,1	-23,7	-3,0	45,4	20,0	0,0	-33,3	-24,4	9,1	0,0	-31,1	9,1
	CS-2-5-191126	-102,3	7,6	24,9		19,8	-4,3	1,3	-4,9	-1,2	-4,9	-5,2	0,0	0,8	50,0	0,0	9,1	-533,3	0,0	-6,7	-313,8	-3,0	-18,4	6,1	63,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-31,1	9,1	

Legende: < -1000 0,0 1000

Abbildung 11: Eliminationsraten der Versuchsreihe zur Co-Substrat-Gabe.

Farblich codiert (negative Eliminationsraten: rot; positive: grün). Für fehlender Parameter keine Daten. Analyseergebnisse s. Anhang 1.1.

Vor dem Hintergrund der festgestellten möglichen Implikationen der Co-Substrat-Gabe auf die Analysegenauigkeit, die in Tabelle 17 zusammengefasst sind, wären ggf. einige Ergebnisse der ersten Projektphase neu zu bewerten. Tabelle 18 stellt die Probenahmestellen der 1. Projektphase zusammen, die ggf. durch die Gabe eines Co-Substrat beeinflusst wurden<sup>8</sup>.

**Tabelle 18: Zusammenstellung von Probenahmestellen der 1. Projektphase deren Analyseergebnisse ggf. neu bewertet werden müssen.**

Messstelle(n)	Fällmittel
BS-3/ BS-4	Methanol
FL-4/ FL-6	Methanol
RA-3	Methanol

---

<sup>8</sup> Vgl. hierzu die Fließschemata im Anhang 3 des Vollberichts zur 1. Projektphase.

### 4.3 Versuchsreihe zum Sorptionsverhalten

Das Sorptionsverhalten wurden mit Hilfe einer Versuchsreihe auf der Versuchskläranlage untersucht (vgl. Abs. 3.2). Die Bestimmung der Sorptionskoeffizienten  $k_d$  erfolgte nach einem linearen Ansatz gem. Gleichung 5 (vgl. Abs. 2.2). Die Analyseergebnisse sowie eine umfassende Auswertung sind in Anhang 3 hinterlegt. Die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Sorptionskoeffizienten  $k_d$  geben in beiden Messwochen die gleiche Größenordnung wieder, was durch eine sehr hohe Korrelation ( $r^2 = 0,87$ ) bestätigt wird (Abbildung 12). Lediglich die festgestellten  $k_d$ -Werte für die PAK sind in der zweiten Messwoche geringer. Die daraus resultierenden geringeren Sorptionsraten sind vermutlich auf geringere TS-Gehalte im Belebt- und Überschussschlamm sowie ein geringeres Schlammalter während der zweiten Messwoche zurückzuführen (vgl. Abs. 3.2 mit Tabelle 5).

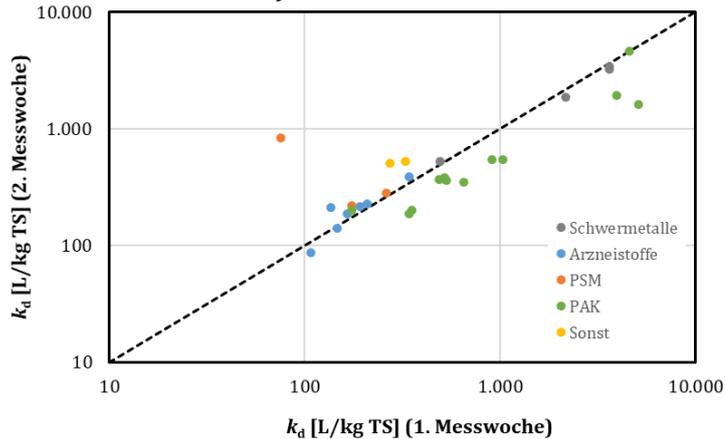


Abbildung 12: Vergleich der in beiden Messwochen ermittelten Sorptionskoeffizienten (gestrichelt ist die Linie gleicher Werte).

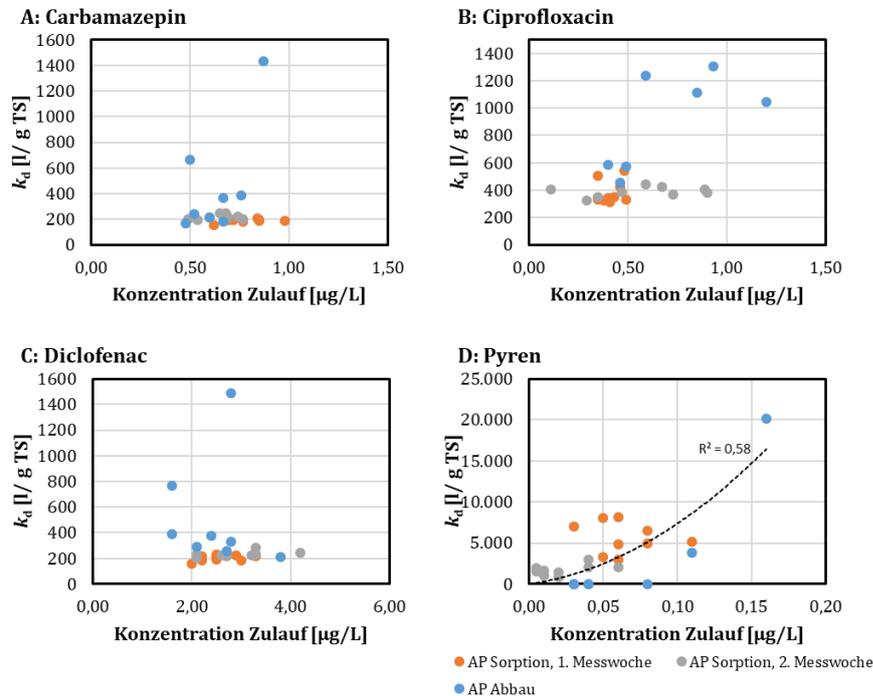
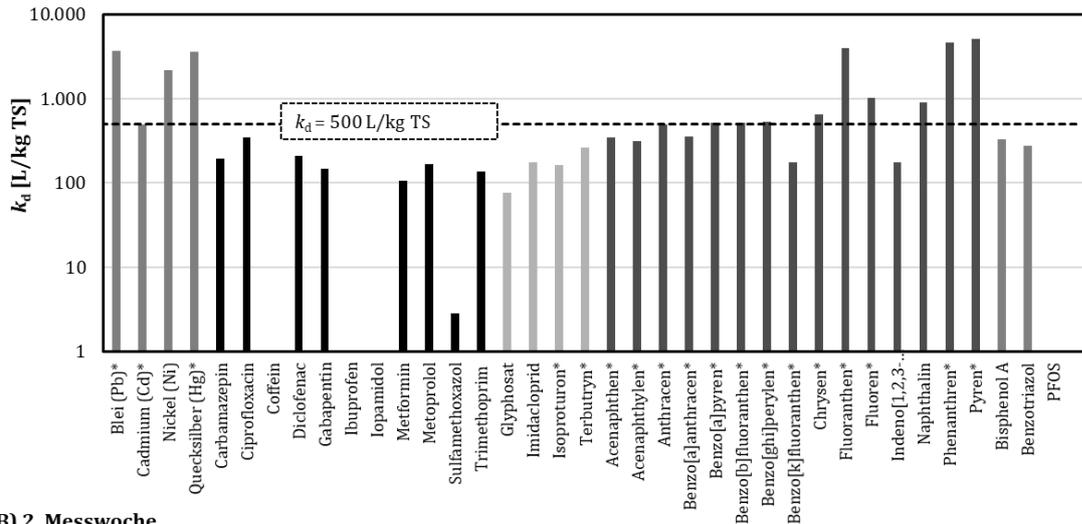


Abbildung 13: Gegenüberstellung von Sorptionskoeffizienten und Zulaufkonzentrationen (Sorption-Isotherme).

A: Carbamazepin (Stoffgruppe I), B: Ciprofloxacin, C: Diclofenac (beide Stoffgruppe II), D: Pyren (Stoffgruppe IV). Sorptionskoeffizienten für Pyren stellen Mindestwerte dar (s. hierzu die Erläuterung zu Beginn von Anhang 3). Dargestellt sind die zeitlich korrespondierenden Daten der Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Abs. 3.2) und des biologischen Abbaus (Abs. 3.3).

A) 1. Messwoche



B) 2. Messwoche

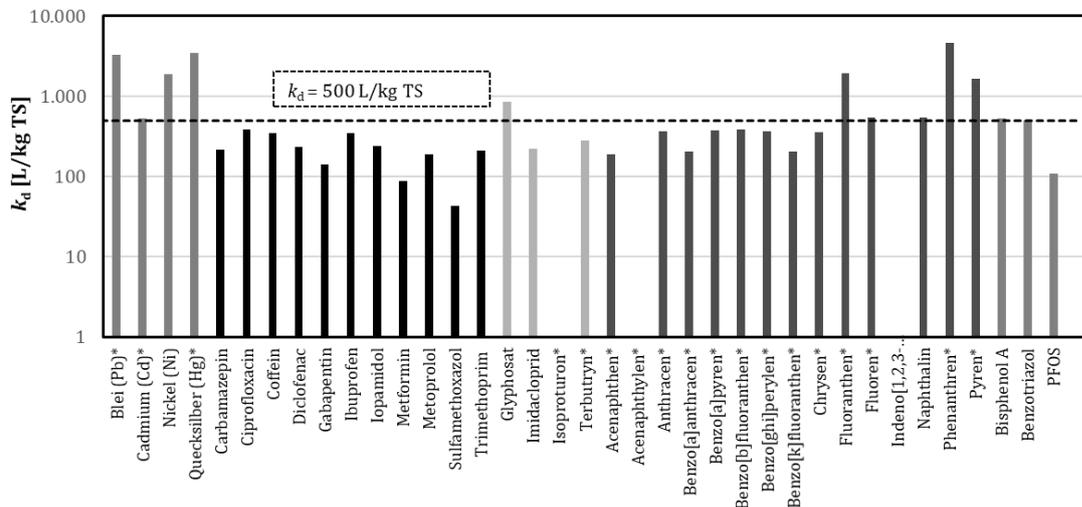


Abbildung 14: Gegenüberstellung der mittleren Sorptionskoeffizienten für beide Messwochen, geordnet nach Stoffklassen.

Geordnet nach Typ (Schwermetalle, Arzneistoffe, Pflanzenschutzmittel, PAK, Sonstige.). Grenze für relevante Sorption bei  $k_d = 500$  L/kg TS entsprechend Tabelle 2. Die Sorptionskoeffizienten für die mit einem \* gekennzeichneten Stoffe sind Mindestwerte.

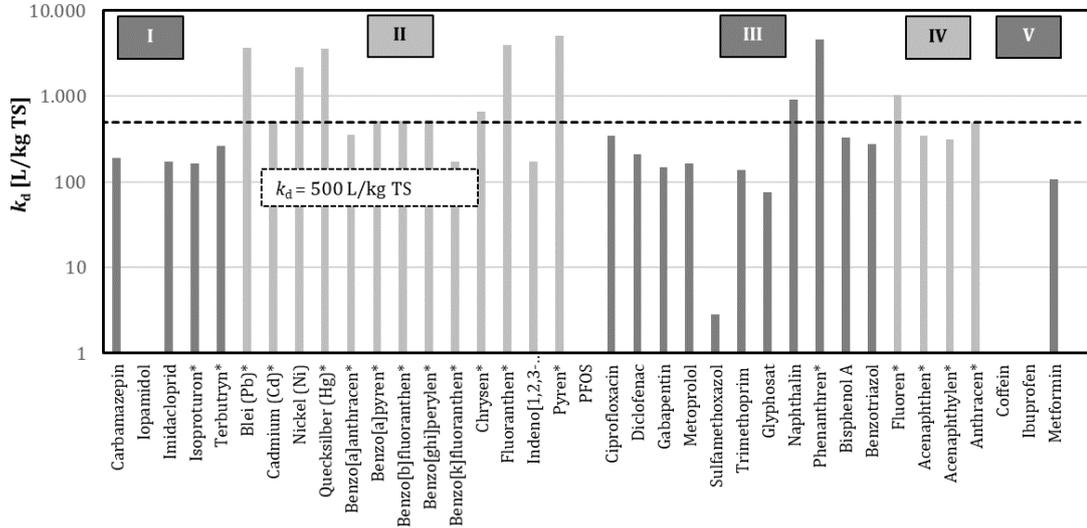
Dieses könnte auf eine Abhängigkeit der Sorptionskoeffizienten von der Zulaufkonzentration hinweisen. Zu erwarten wäre ein linearer oder exponentieller Zusammenhang (z. B. gem. des Freundlich-Isotherms, vgl. Abs. 2.2) Wie Abbildung 13 exemplarisch für Ciprofloxacin und Diclofenac zeigt, konnte dieser Zusammenhang nicht nachgewiesen werden. Tendenziell scheint der Sorptionskoeffizient mit der Stoffkonzentration bei Stoffen zuzunehmen, die zur Sorption neigen (s. Abbildung 13B und D). Hierzu zählt Ciprofloxacin, dessen Sorptionskoeffizient deutlich variiert (s. hierzu auch Abbildung 34 in Abs. 5.1).

Wie Abbildung 14 zeigt, weisen die Schwermetalle und PAK die größten Sorptionskoeffizienten auf. Zwischen beiden Messwochen sind keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. Für Stoffe, bei denen die Konzentration der Zulaufprobe unterhalb der Bestimmungsgrenze lag, wurde der  $k_d$ -Wert unter Verwendung dieser Bestimmungsgrenze als Mindestwert berechnet. Stoffe, bei denen keine Stoffkonzentration am Belebtschlamm festgestellt wurden, bleiben in Abbildung 14 unberücksichtigt, da kein Wert (nach Gl. 5, Abs. 2.2.) bestimmt werden kann.

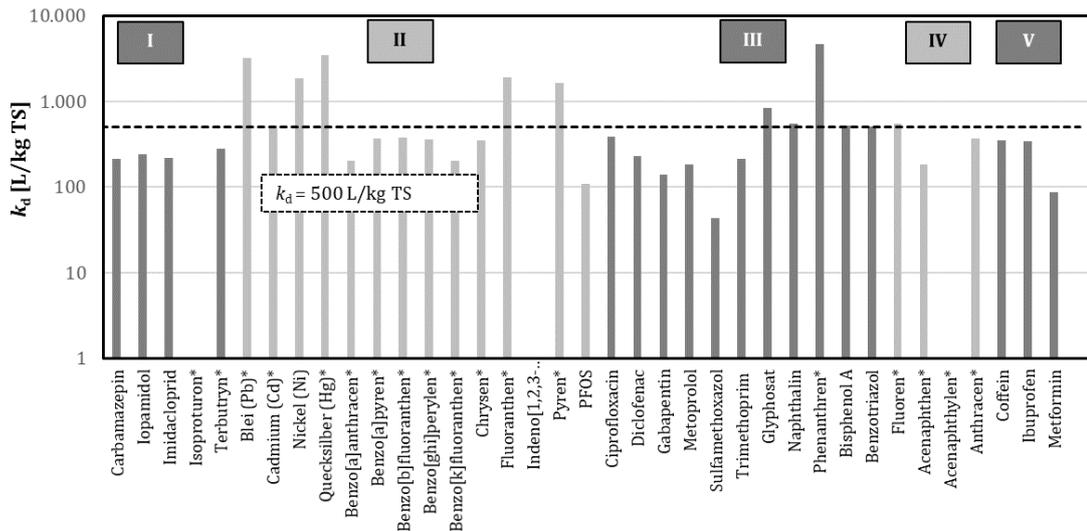
Wie eine Sortierung der Daten nach Stoffgruppen gem. Tabelle 2 zeigt (Abbildung 15), trifft die bisherige Zuordnung der meisten Stoffe zu einer Stoffgruppe in den meisten Fällen zu. Nur die

Zuordnung einzelner Stoffe (hier z.B. Phenanthren und Naphthalin mit Sorptionskoeffizienten von  $k_d > 500$  L/kg TS in beiden Messwochen) müsste überprüft und ggf. angepasst werden. Dieser Aspekt wird umfassend in Abs. 5.1 diskutiert.

A) 1. Messwoche



B) 2. Messwoche



**Abbildung 15: Gegenüberstellung der mittleren Sorptionskoeffizienten für beide Messwochen, geordnet nach Stoffgruppen.**

Grenze für relevante Sorption bei  $k_d = 500$  L/kg TS entsprechend Tabelle 2. Die Sorptionskoeffizienten für die mit einem \* gekennzeichneten Stoffe sind Mindestwerte.

Generell lässt sich erkennen, dass sich eine Änderung der Zulaufkonzentration zeitlich versetzt auswirkt. Wie Abbildung 16A am Beispiel von Glyphosat deutlich zeigt, ist ein Konzentrationspunkt von  $136 \mu\text{g/L}$  im Zulauf erst in der übernächsten Ablaufprobe (d. h. im Mittel 16 Stunden später) bemerkbar. Zugleich variiert entsprechend Gleichung 1 der  $k_d$ -Wert, der zugleich abnimmt. Dieser zeitliche Versatz muss bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden. Er entspricht etwa der hydraulischen Aufenthaltszeit, die anhand einer Tracer-Messung auf der VAK bestimmt wurde (Daten hier nicht gezeigt).

Der korrespondierende Anstieg der Konzentrationen im Überschussschlamm ist erst rund 32 Stunden nach der Zulauf-Konzentrationspitze feststellbar (vgl. Abbildung 16B). Dieses ist auf

die zusätzlich Sedimentations- und Eindickzeit in der Nachklärung zurückzuführen, die deutlich über der hydraulischen Aufenthaltszeit des Wasserpfades liegt. Insgesamt führt das dazu, dass sich veränderliche Zulaufkonzentrationen nur sehr langsam in geänderten Konzentrationen im Beleb- oder Überschussschlamm bemerkbar machen. Insgesamt führt dieses Phänomen zu relativ konstanten Konzentrationen im Überschussschlamm und schließlich im Klärschlamm.

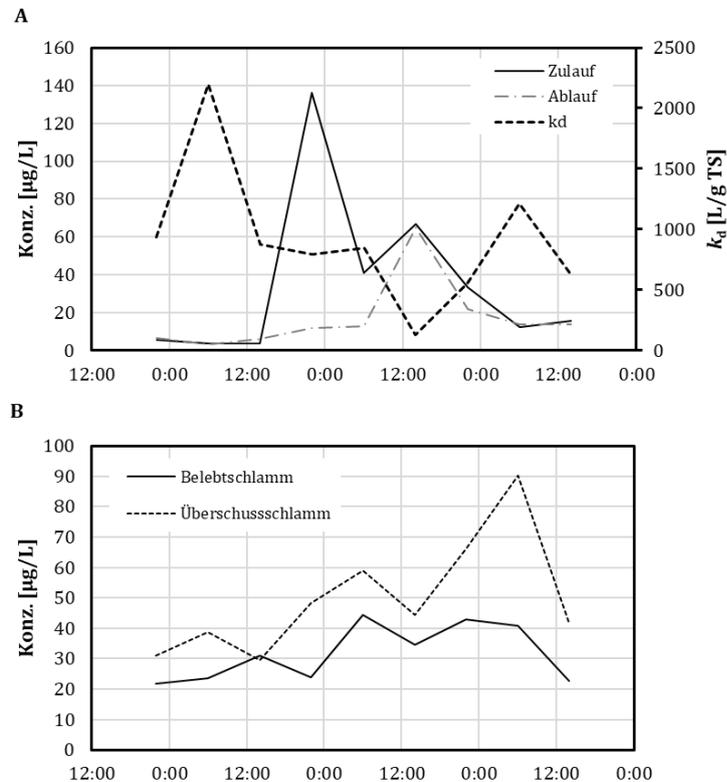


Abbildung 16: Zusammenstellung der festgestellten Konzentrationen und des Sorptionskoeffizienten für Glyphosat, Messwoche 2.

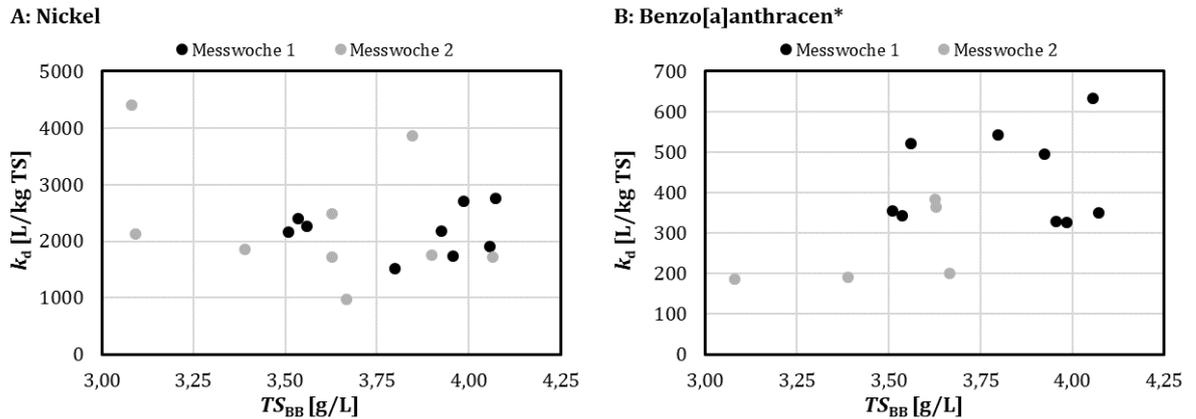
#### 4.3.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung

Wie in Abs. 2.2 und 2.5 dargelegt, nimmt die Sorptionsrate mit steigendem TS-Gehalt und steigender Anzahl der aufgrund der extrazellulären Polymer (EPS) negativ geladenen Mikroorganismen prinzipiell zu. Dieses konnte durch die Ergebnisse der ersten Projektphase für die **Stoffgruppen II und IV** (insbesondere für Nickel) nachgewiesen werden<sup>9</sup>.

Bezogen auf die hier berechneten  $k_d$ -Werte kann hingegen eine nur geringe Abhängigkeit erkannt werden (Abbildung 17A, weitere Diagramme s. Anhang 3.2). Der lineare Korrelationskoeffizient beträgt hierfür 0,05 bzw. -0,34 für die 1. bzw. 2. Messwoche (eine Zusammenstellung und Diskussion der Korrelationskoeffizienten erfolgt in Abs. 4.3.5). Für die PAK mit einer relativ hohen Anzahl von Benzol-Ringen lässt sich eine deutlichere Sorptionsneigung erwarten<sup>10</sup>. Eine vergleichsweise hohe Korrelation zwischen Sorptionskoeffizient und TS-Gehalt im Belebungsbecken konnte für Benzo[a]anthracen mit 4 Benzol-Ringen festgestellt werden ( $r^2 = 0,12$  bzw. 0,59, vgl. Abbildung 17B). Für höherkondensierte PAK konnte indes keine erhöhte Korrelation festgestellt werden (vgl. Anhang 3.2 und Abs. 4.3.5).

<sup>9</sup> Vgl. Vollbericht, 1. Projektphase, Abs. 6.1.1.

<sup>10</sup> Vgl. Vollbericht, 1. Projektphase, Abs. 5.5.1.

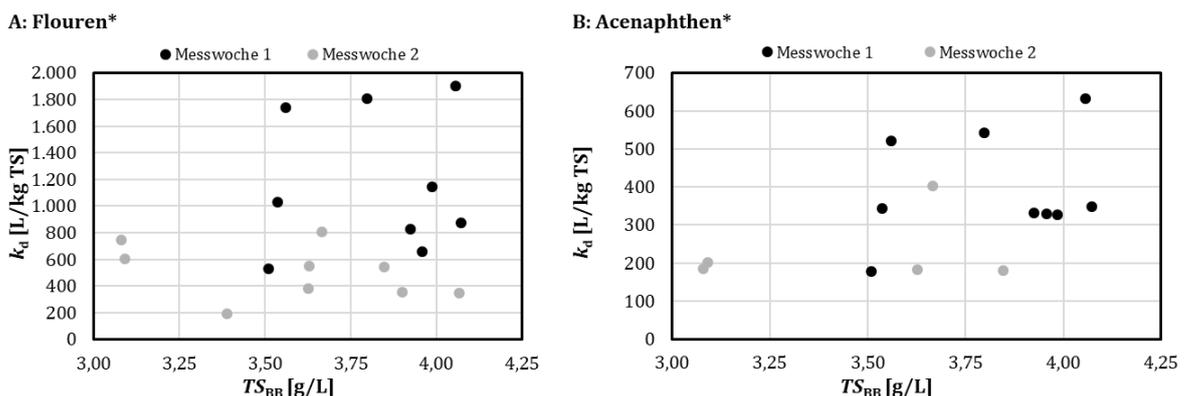


**Abbildung 17: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe II. A: Nickel, B: Benzo[a]anthracen.**

\* Die angegebenen Sorptionskoeffizienten in diesem Diagramm stellen jeweils Mindestwerte dar (s. hierzu die Ausführungen zu Beginn von Anhang 3).

Analog dazu lässt sich für die Spurenstoffe der **Stoffgruppe IV**, die ebenfalls zur Sorption neigen, ein nur geringer Einfluss des TS-Gehaltes in der Belebung auf den Sorptionskoeffizienten feststellen (exemplarisch Abbildung 18, weitere Beispiel in Anhang 3.2). Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten betragen für Flouren  $r^2 = 0,07$  bzw.  $-0,36$  und für Acenaphthen  $r^2 = -0,70$  (konnte in der 2. Messwoche nicht ermittelt werden). Es ist dennoch wenigstens für Flouren eine leicht positive Abhängigkeit zu vermuten.

Die für Stoffgruppe IV erhobenen Daten repräsentieren geringkondensierte PAK mit 3 oder 4 Benzol-Ringen. Diese gering sorptionsaffinen Stoffe werden überdies möglicherweise biologisch abgebaut, wodurch die Bestimmung der Sorption verzerrt wird. Die Auswertung wird überdies dadurch erschwert, dass die im Klarwasser verbleibenden Restkonzentrationen unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf diese Bestimmungsgrenze und sind daher hinsichtlich der Sorption als Mindestwerte zu interpretieren.

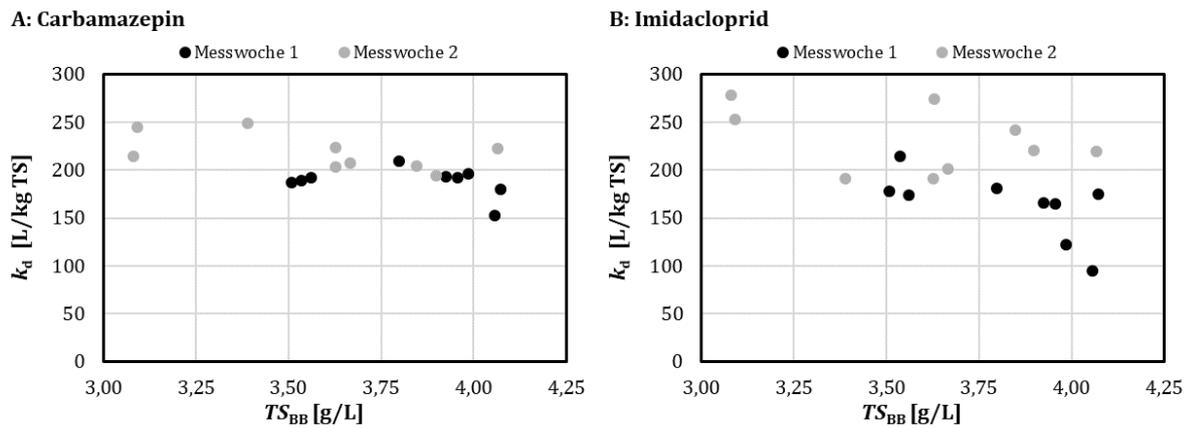


**Abbildung 18: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe IV. A: Flouren, B: Acenaphthen.**

\* Die angegebenen Sorptionskoeffizienten in diesem Diagramm stellen jeweils Mindestwerte da (s. hierzu die Ausführungen zu Beginn von Anhang 3).

Für Spurenstoffe der **Stoffgruppe I** konnte keine positive Korrelation zwischen dem Sorptionskoeffizienten und dem TS-Gehalt in der Belebung festgestellt werden. Wie Abbildung 19 nahelegt, ist vielmehr eine negative Korrelation (insbesondere für Imidacloprid mit  $r^2 = -0,65$  bzw.  $-0,39$ ) zu vermuten. Dieses deutet darauf hin, dass sich die gelöste Konzentration dieses

Stoffes bei einer Zunahme des TS-Gehaltes in der Belebung erhöht. Ursächlich hierfür ist die rechnerische Bestimmung der Sorptionskoeffizienten nach Gleichung 5 (Abs. 2.2), die bei (relativ) konstanten Konzentrationen abnehmende  $k_d$ -Werte bei steigendem TS-Gehalt zur Folge hat.



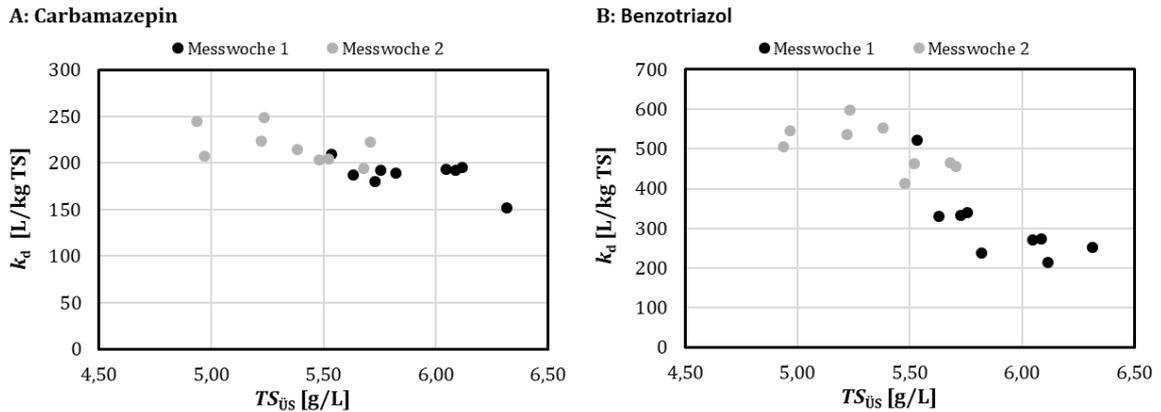
**Abbildung 19: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung für Stoffgruppe I. A: Carbamazepin, B: Imidacloprid.**

Für die mäßig bis gut biologisch abbaubaren, nicht sorptionsaffinen Stoffe der **Stoffgruppen III und V** kann kein Zusammenhang zwischen dem TS-Gehalt in der Belebung und dem Sorptionskoeffizienten erkannt werden (vgl. hierzu Anhang 3.2). Für einige Stoffe ergibt sich ebenfalls aufgrund der o.g. rechnerischen Problematik bei konstanten Konzentrationen eine leicht negative Korrelation.

Der Trockensubstanzgehalt wurde für vorliegende Versuchsreihen in einem Bereich von 3,0 bis etwa 4,1 kg TS/m<sup>3</sup> variiert. Dieses entspricht den üblicherweise in der betrieblichen Praxis angestrebten Zielgrößen. Für diesen Bereich kann kein relevanter Einfluss auf die Sorption erkannt werden.

#### 4.3.2 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm

Für einige Stoffe wurde mit zunehmenden TS-Gehalt im Überschussschlamm  $X_{TS,ÜS}$  ein abnehmender Sorptionskoeffizient  $k_d$  festgestellt. Dieses Verhalten konnte für Spurenstoffe der **Stoffgruppe I** (Carbamazepin, Imidacloprid) sowie **Stoffgruppe III** (Sulfamethoxazol, Trimethoprim, Bisphenol A, Benzotriazol und Glyphosat) beobachtet werden (vgl. Anhang 3.2). Diese Stoffgruppen unterliegen allerdings theoretisch einer geringen oder vernachlässigbaren Sorption. Wie Abbildung 20 exemplarisch für Carbamazepin ( $r^2 = -0,57$  bzw.  $-0,51$ , Stoffgruppe I) und Benzotriazol ( $r^2 = -0,75$  bzw.  $-0,60$ , Stoffgruppe III) zeigt, stellt sich bei hohem TS-Gehaltes im Sekundärschlamm eine Abnahme des  $k_d$ -Wertes ein.

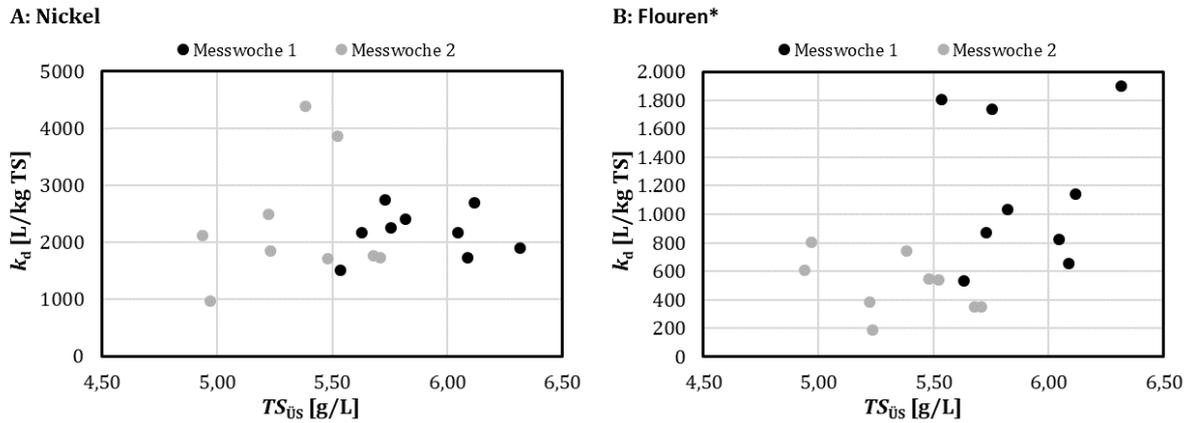


**Abbildung 20: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm A: Carbamazepin (Stoffgruppe I), B: Imidacloprid (Stoffgruppe III).**

Dieser Effekt beruht auf einem systematischen Fehler, der bei Anwendung von Gleichung 5 (Abs. 2.2) nicht zu vermeiden ist: Zur Berechnung des Sorptionskoeffizienten  $k_d$  werden die Spurenstoff-Konzentrationen im Überschussschlamm und im Ablaufwasser herangezogen. Gerade die Stoffgruppen I und III zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht vollständig zurückgehalten werden (weder durch Sorption noch durch Abbau) und folglich eine relativ konstante Konzentration aufweisen, die nicht direkt vom TS-Gehalt abhängt.

Weiterhin wird zur Berechnung des  $k_d$ -Wertes nach Gleichung 5 der Trockensubstanzgehalt im Überschussschlamm (im Nenner) benötigt. Da beide Konzentrationen (relativ) konstant sind, führt ein steigender TS-Gehalt zu einem Anstieg des  $k_d$ -Wert. Dieser Zusammenhang ist reziprok, was sich in den verhältnismäßig hohen negativen Korrelationskoeffizienten widerspiegelt. Grundsätzlich wäre Gleiches für die Berechnung des  $k_d$ -Wertes im Belebtschlamm (Abs. 4.3.1) zu erwarten. Aufgrund der relativ geringen Spanne der realisierten TS-Gehalte (3,0 bis 4,1 kg TS/m<sup>3</sup>) ist dieser Effekt dort allerdings weniger deutlich, obschon erkennbar (vgl. hierzu die Zusammenstellung der linearen Korrelationskoeffizienten in Abs. 4.3.5).

Für einige der prinzipiell sorptionsaffinen Spurenstoffe der **Stoffgruppe II** (Pyren, Fluoranthen, Chrysen, Benzo[ghi]perylen, Nickel, Benzo[a]anthracen) und **Stoffgruppe IV** (Fluoren, Acenaphthen, Anthracen) kann mit zunehmendem TS-Gehalt im Überschussschlamm ein tendenziell steigender Sorptionskoeffizient festgestellt werden. Abbildung 21 zeigt exemplarisch die Zusammenhänge für Nickel ( $r^2 = 0,04$  bzw.  $0,20$ , Stoffgruppe II) und Fluoren ( $r^2 = 0,07$  bzw.  $-0,42$ , Stoffgruppe IV). Eine deutliche Abhängigkeit kann hieraus nicht abgeleitet werden. Es kann folglich nicht auf eine nennenswert verbesserte Sorption geschlossen werden.



**Abbildung 21: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm A: Nickel (Stoffgruppe II), B: Fluoren (Stoffgruppe IV).**

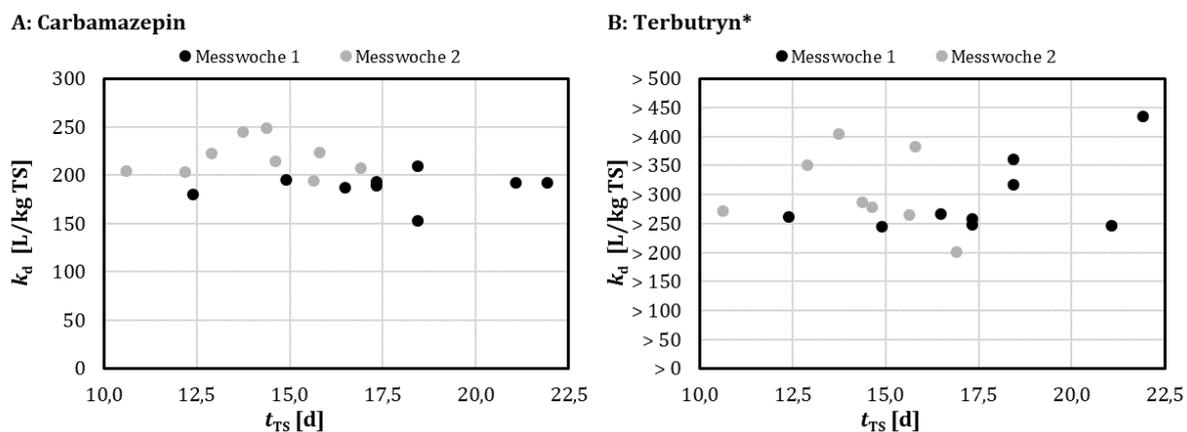
\* Die angegebenen Sorptionskoeffizienten in diesem Diagramm stellen jeweils Mindestwerte da (s. hierzu die Ausführungen zu Beginn von Anhang 3).

Vielmehr scheinen weitere Faktoren das Sorptionsverhalten zu beeinflussen. Wie die Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten für die beiden Messwochen zeigt (Abs. 4.3.5), gibt es hinsichtlich des TS-Gehaltes im Überschussschlamm einen deutlichen Unterschied zwischen beiden Messwochen. Die Gründe hierfür sind unklar.

Für Substanzen der **Stoffgruppe V** (gut biologisch abbaubar, nicht sorptionsaffin) kann keine Abhängigkeit zwischen dem TS-Gehalt im Überschussschlamm und dem Sorptionskoeffizienten festgestellt werden (vgl. hierzu Anhang 3.2 und Abs. 4.3.5).

### 4.3.3 Einfluss des Schlammalters

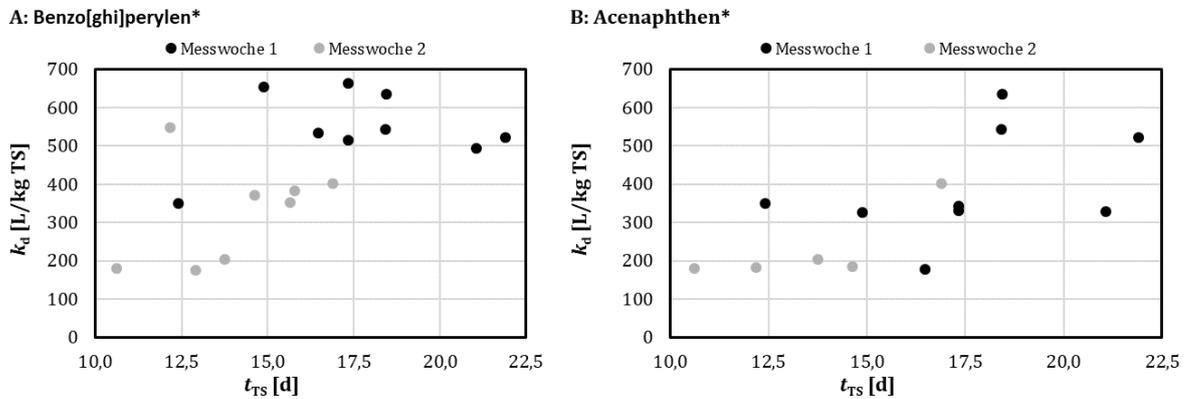
Bei den Substanzen der **Stoffgruppe I** hat die Variation des Schlammalters keinen systematischen Einfluss auf die ermittelten Sorptionskoeffizienten, wie Abbildung 22 zeigt (für Carbamazepin:  $r^2 = 0,11$  bzw.  $0,03$ ; für Terbutryn:  $0,57$  bzw.  $-0,23$ ). Da diese Stoffgruppe weder durch Sorption noch durch Abbau beeinflusst wird, ist diese Beobachtung schlüssig.



**Abbildung 22: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schlammalters für Substanzen der Stoffgruppe I. A: Carbamazepin. B: Terbutryn.**

\* Die angegebenen Sorptionskoeffizienten in diesem Diagramm stellen jeweils Mindestwerte da (s. hierzu die Ausführungen zu Beginn von Anhang 3).

Für die sorptionsaffinen Substanzen der **Stoffgruppen II und IV** lässt sich hingegen in den meisten Fällen eine positive Korrelation vermuten. Wie Abbildung 23 zeigt, scheinen Sorptionskoeffizienten mit steigendem Schlammalter zuzunehmen (für Bezo[ghi]perylen:  $r^2 = 0,22$  bzw. 0,35 und für Acenaphthen:  $r^2 = 0,33$ , in der 2. Messwoche nicht bestimmbar). Da diese Stoffe als nicht biologisch abbaubar gelten, kann daraus geschlossen werden, dass ein erhöhtes Schlammalter eine veränderte Schlammmstruktur und damit erhöhte Sorptionsraten zur Folge hat.



**Abbildung 23: Sorptionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schlammalters. A: Benzo[ghi]perylen (Stoffgruppe II), B: Acenaphthen (Stoffgruppe IV).**

\* Die angegebenen Sorptionskoeffizienten in diesem Diagramm stellen jeweils Mindestwerte da (s. hierzu die Ausführungen zu Beginn von Anhang 3).

Auf das Sorptionsverhalten der ohnehin nicht sorptionsaffinen **Stoffgruppen III und V** hat die Erhöhung des Schlammalters erwartungsgemäß keinen Einfluss (vgl. hierzu Anhang 3.2, Daten hier nicht gezeigt).

#### 4.3.4 Einfluss der Schlammbelastung

Hinsichtlich der Schlammbelastung kann kein Einfluss auf die Substanzen der **Stoffgruppe I** festgestellt werden (Anhang 3.2). Beide Messwochen unterscheiden sich hinsichtlich der Schlammbelastung nicht voneinander (vgl. Abs., 3.2 mit Tabelle 5). Die Zusammenhänge zwischen Sorptionskoeffizient und Schlammbelastung sind für die anderen Stoffgruppen hingegen sehr inhomogen und unterschieden sich deutlich in beiden Wochen. In keinem Fall lässt sich allerdings eine klare Korrelation in beiden Wochen zur Deckung bringen (vgl. hierzu die Zusammenstellung in Abs. 4.3.5).

Die Unterschiede zwischen beiden Messwochen treten insbesondere für einige Vertreter der **Stoffgruppen II und IV** auf (Anhang 3.2). Für die nicht sorptionsaffinen Stoffe der **Stoffgruppen III und V** lässt sich ebenfalls kein Zusammenhang zwischen der Schlammbelastung und dem  $k_d$ -Wert erkennen. Es wird damit deutlich, dass die Schlammbelastung kein geeigneter Parameter zur Prognose des Sorptionsverhaltens ist.

#### 4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Sorptionsverhalten

Für die meisten untersuchten Spurenstoffe ist die Hydrophobizität der Verbindung ein wichtiger Indikator für die Adsorption. Es wird deutlich, dass die Varianz der Bioadsorptionskapazität des Belebtschlammes während der gesamten Versuchsdauer auf Unterschiede in der Konzentration von bakteriellen extrazellulären Polymeren (EPS) zu verschiedenen Probenahmezeitpunkten zurückzuführen ist.

Im Weiteren wird der Einfluss der Tabelle 5 (Abs. 3.2) genannten Betriebsparameter untersucht. Wie die in Tabelle 19 zusammengestellten Korrelationskoeffizienten zeigen, hat eine

Variation dieser Betriebsparameter vor Allem einen Einfluss auf Stoffe der Stoffgruppen II und IV. Eine Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes (im Belebt- oder im Überschussschlamm) hat daher einen verbesserten Rückhalt von sorptionsaffinen Spurenstoffen zur Folge. Gleiches lässt sich für ein höheres Schlammalter feststellen. Gemessen an der Verbesserung der Eliminationsrate ist dieser Effekt allerdings kaum von Bedeutung.

Tabelle 20 fasst qualitativ den Einfluss der Betriebsparameter auf das Sorptionsverhalten zusammen. Es wird deutlich, dass durch eine Erhöhung der genannten Parameter die sorptionsaffinen Stoffe besser zurückgehalten werden können.

**Tabelle 19: Lineare Korrelationskoeffizienten  $r^2$  für die Korrelation des Sorptionskoeffizienten  $k_a$  mit unterschiedlichen Betriebsparametern.**

Hohe Korrelationskoeffizienten deuten auf einen linearen Zusammenhang hin, der gegenläufig (negativ) oder gleichgerichtet (positiv) sein kann.  $TS_{BB}$  = Trockensubstanzgehalt in der Belebungsstufe,  $TS_{ÜS}$  = Trockensubstanzgehalt im Überschussschlamm,  $t_{TS}$  = Schlammalter,  $B_{TS}$  = Schlammbelastung.

		1. Messwoche				2. Messwoche			
		$TS_{BB}$	$TS_{ÜS}$	$t_{TS}$	$B_{TS}$	$TS_{BB}$	$TS_{ÜS}$	$t_{TS}$	$B_{TS}$
I	Carbamazepin	-0,33	-0,57	0,11	-0,39	-0,53	-0,51	0,03	0,51
	Iopamidol					-0,18	0,41	-0,63	-0,40
	Imidacloprid	-0,65	-0,75	0,03	0,25	-0,39	0,17	-0,50	0,09
	Isoproturon	-0,28	-0,35	-0,38	0,04				
	Terbutryn	-0,34	-0,34	0,57	0,00	-0,21	-0,09	-0,23	0,47
II	Blei (Pb)	-0,09	0,03	0,68	0,19	-0,43	-0,44	0,35	0,16
	Cadmium (Cd)	-0,09	0,20	0,64	0,12	-0,02	0,04	0,41	-0,33
	Nickel (Ni)	0,05	0,04	-0,66	-0,39	-0,34	0,20	-0,39	-0,19
	Quecksilber (Hg)	-0,53	-0,41	0,58	0,36	-0,09	-0,30	0,20	0,43
	Benzo[a]anthracen	0,12	0,17	0,41	0,16	0,59	0,37	-0,33	0,59
	Benzo[a]pyren	0,36	0,46	0,05	-0,40	-0,36	-0,42	-0,17	0,51
	Benzo[b]fluoranthren	0,36	0,46	0,05	-0,40	-0,30	-0,30	0,22	0,40
	Benzo[ghi]perylen	0,07	0,55	0,22	-0,02	-0,14	-0,09	0,35	0,00
	Benzo[k]fluoranthren	0,42	0,25	-0,16	-0,45	0,52	0,58	-0,84	0,40
	Chrysen	0,18	0,39	0,25	0,05	-0,24	-0,11	-0,04	0,29
	Fluoranthren	0,08	0,12	0,30	-0,22	-0,18	-0,36	0,30	0,15
	Indeno[1,2,3-cd]pyren	0,49	0,50	0,01	-0,04				
	Pyren	-0,15	0,11	0,35	-0,10	0,00	-0,25	0,41	0,05
	PFOS					0,53	-0,55	0,45	0,46
III	Ciprofloxacin	-0,22	-0,75	-0,25	-0,17	-0,34	-0,34	-0,46	0,44
	Diclofenac	-0,40	-0,52	0,05	0,03	-0,59	-0,66	-0,18	0,76
	Gabapentin	-0,78	-0,55	-0,11	0,40	-0,10	0,00	-0,29	0,32
	Metoprolol	-0,83	-0,67	0,08	0,27	-0,31	-0,27	-0,27	0,50
	Sulfamethoxazol	0,18	0,04	0,01	-0,45	-0,34	-0,47	-0,21	0,68
	Trimethoprim	0,18	-0,13	0,08	-0,55	-0,22	-0,29	0,22	0,06
	Glyphosat	0,36	0,45	0,36	0,25	0,24	0,48	-0,30	-0,44
	Naphthalin	0,50	0,51	0,12	-0,07	-0,70	-0,63	-0,06	0,85
	Phenanthren	-0,60	-0,60	-0,91	-0,44	0,10	-0,28	0,31	0,19
	Bisphenol A	-0,11	-0,39	-0,06	-0,24	-0,31	-0,19	0,07	0,34
Benzotriazol	-0,18	-0,75	0,13	-0,22	-0,55	-0,60	0,58	0,19	
IV	Fluoren	0,07	0,07	0,35	-0,07	-0,36	-0,42	0,12	0,29
	Acenaphthen	0,25	0,21	0,41	0,06	0,26	-0,64	0,80	0,08
	Acenaphthylen	-0,70	-0,18	0,33	0,63				
	Anthracen	0,21	0,14	0,39	-0,07	-0,17	-0,04	-0,37	0,20
V	Coffein					-0,11	-0,27	0,65	-0,22
	Ibuprofen					0,59	-0,98	0,83	0,69
	Metformin	-0,42	-0,76	0,12	0,06	-0,02	0,26	0,36	-0,28
Legende [ $r^2$ ]:		-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0			

**Tabelle 20: Qualitative Bewertung der relevanten Betriebsparameter auf den Rückhalt von Vertretern der unterschiedlichen Stoffgruppen.**

	Stoffgruppe				
	I	II	III	IV	V
$TS_{BB}$	kein Einfluss (rechn. Abnahme)	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss (rechn. Abnahme)	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss
$TS_{\ddot{u}s}$	kein Einfluss (rechn. Abnahme)	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss (rechn. Abnahme)	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss
$t_{TS}$	kein Einfluss	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss	<b>linearer Trend</b>	kein Einfluss
$B_{TS}$	kein Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss

Insgesamt lässt sich feststellen, dass in der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorption gelegentlich einzelne Ausreißer auftreten (z. B. Glyphosat mit  $k_{d,max} = 3964$  L/kg TS oder Bisphenol A mit  $k_{d,max} = 3391$  L/kg TS), obschon die Mehrzahl der Ergebnisse in einer anderen Größenordnung (in den genannten Fällen um eine oder gar zwei log-Stufen niedriger) liegt (s. Anhang 3.1 für weitere Beispiele). Dieses ist möglicherweise einem nicht ideal geeigneten Versuchsaufbau geschuldet. Die um 24 Stunden zeitversetzte Probenahme zwischen Zu- und Ablauf (jeweils als 8-Stunden-Mischprobe) soll der mittleren hydraulischen Aufenthaltszeit Rechnung tragen. Obschon bekannt ist, dass die Sorption ein schneller Prozess ist (etwa 30 min) hat diese Art der Probenahme eine gewisse Unschärfe, die möglicherweise zur eingangs erläuterten Ausreißer-Problematik beiträgt. Viele Ausreißer bei der Ermittlung der Sorptionskoeffizienten korrelieren überdies mit einem sehr geringen TS-Gehalt in der korrespondierenden Überschussschlamm-Probe, der fraglich scheint. Hinzu kommen ggf. analytische Ungenauigkeiten (wie sie für Glyphosat erkannt wurde [vgl. Abs. 4.2.4]), die zu Minderbefunden und schließlich einer fehlerhaften Datenauswertung führen können.

#### 4.4 Versuchsreihe zum biologischen Abbau

Die Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus erfolgten auf zwei baugleichen Versuchsanlagen (= Modellkläranlagen), die parallel mit demselben Rohabwasser beschickt wurden (vgl. Abs. 3.3). Damit wird die vergleichende Untersuchung verschiedener Betriebsparameter möglich. Es wurden insgesamt vier Messwochen durchgeführt.

Abbildung 24 stellt die nach Gleichung 1b (Abs. 2.1) ermittelten dynamischen Biodegradationskonstanten  $k_{\text{bio,dyn}}$  zusammen, die relevant für eine Beurteilung der Abbaubarkeit sind. Für die nicht biologisch abbaubare **Stoffgruppe I** liegen die festgestellten  $k_{\text{bio,dyn}}$ -Werte im Übergangsbereich vom nicht abbaubaren zum mäßig biologisch abbaubaren Wertebereich ( $k_{\text{bio}} = 0,1 \text{ L}/(\text{g TS} \cdot \text{d})$ ).

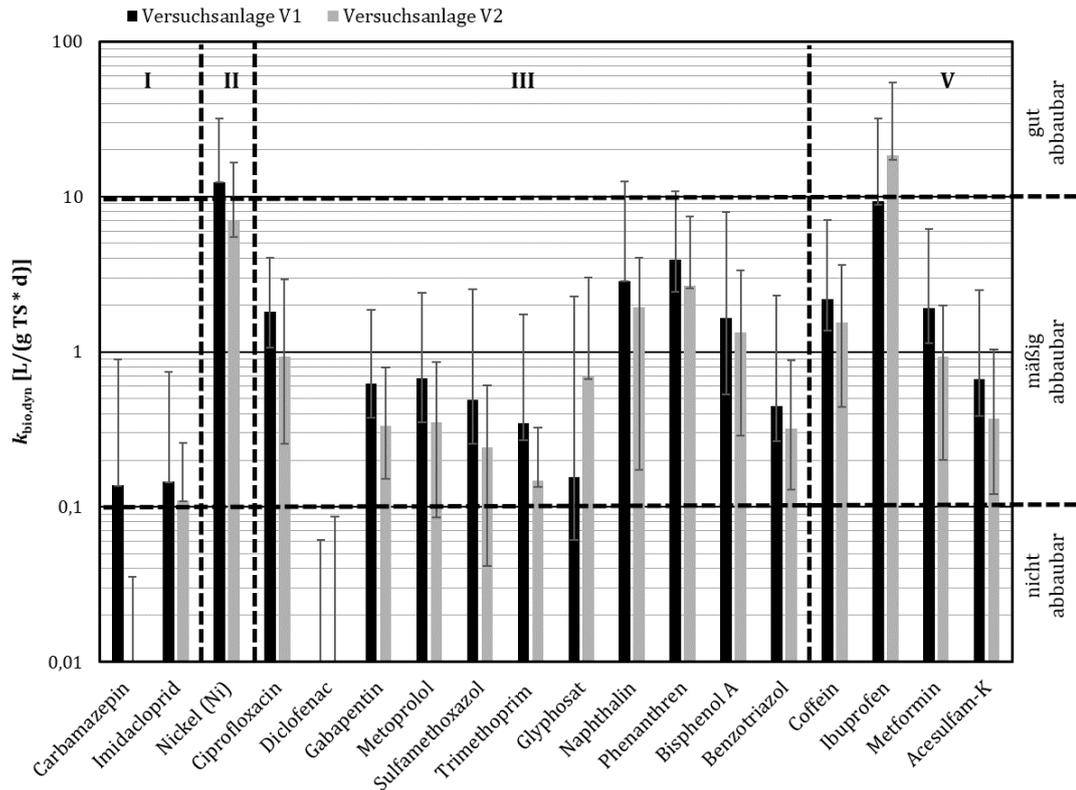
Aus der ansonsten sorptionsaffinen, nicht biologisch abbaubaren **Stoffgruppe II** konnten lediglich Daten für das sicher nicht biologisch abbaubare **Nickel** gewonnen werden. Die rechnerische Biodegradationskonstante, die auf eine gute Abbaubarkeit hindeuten würde, ist in diesem Fall auf ein analytisches Problem infolge der Bildung von Wasserstoff-Brückenbindungen zurückzuführen. Gleiches wurde in der Versuchsreihe zur Ermittlung des Einflusses der Co-Substrate beobachtet (vgl. Abs. 4.2.2). Schließlich führt dieses Phänomen zu einer Unterschätzung der Ablaufkonzentrationen und damit rechnerisch zu einem biologischen Abbau.

Die mäßig biologisch abbaubaren Substanzen der **Stoffgruppe III** liegen fast ausschließlich im erwarteten Bereich ( $k_{\text{bio}} = 0,1$  bis  $10 \text{ L}/(\text{g TS} \cdot \text{d})$ ). Prominente Ausnahme hiervon ist **Diclofenac**, das sich in der hier diskutierten Versuchsreihe als praktisch nicht abbaubar erwiesen hat ( $k_{\text{bio,dyn}} \ll 0,1 \text{ L}/(\text{g TS} \cdot \text{d})$ ), da Zulauf- und Ablaufkonzentration praktisch identisch sind (Anhang 4.1). Dennoch wird Diclofenac weiterhin der Stoffgruppe III zugeordnet (mehr dazu s. Abs. 5.1).

Für Vertreter der **Stoffgruppe IV** konnten keine Daten hinsichtlich des biologischen Abbaus ermittelt werden. Die als sehr gut abbaubar geltenden Vertreter der **Stoffgruppe V** zeigen durchgängig (auch im Vergleich zur Stoffgruppe III) relativ höhere  $k_{\text{bio,dyn}}$ -Werte. Die von Joss et al. (2006) genannte Grenze zwischen mäßigem und gutem biologischen Abbau (vgl. Abs. 2.1) von  $k_{\text{bio}} = 10 \text{ L}/(\text{g TS} \cdot \text{d})$  wird jedoch nur im Einzelfall erreicht. Die Unterscheidung nach gut und sehr gut abbaubar bei  $k_{\text{bio}} = 5 \text{ L}/(\text{g TS} \cdot \text{d})$  von Suarez et al. (2010) scheint für die Stoffgruppen-Einteilung zweckmäßiger<sup>11</sup>.

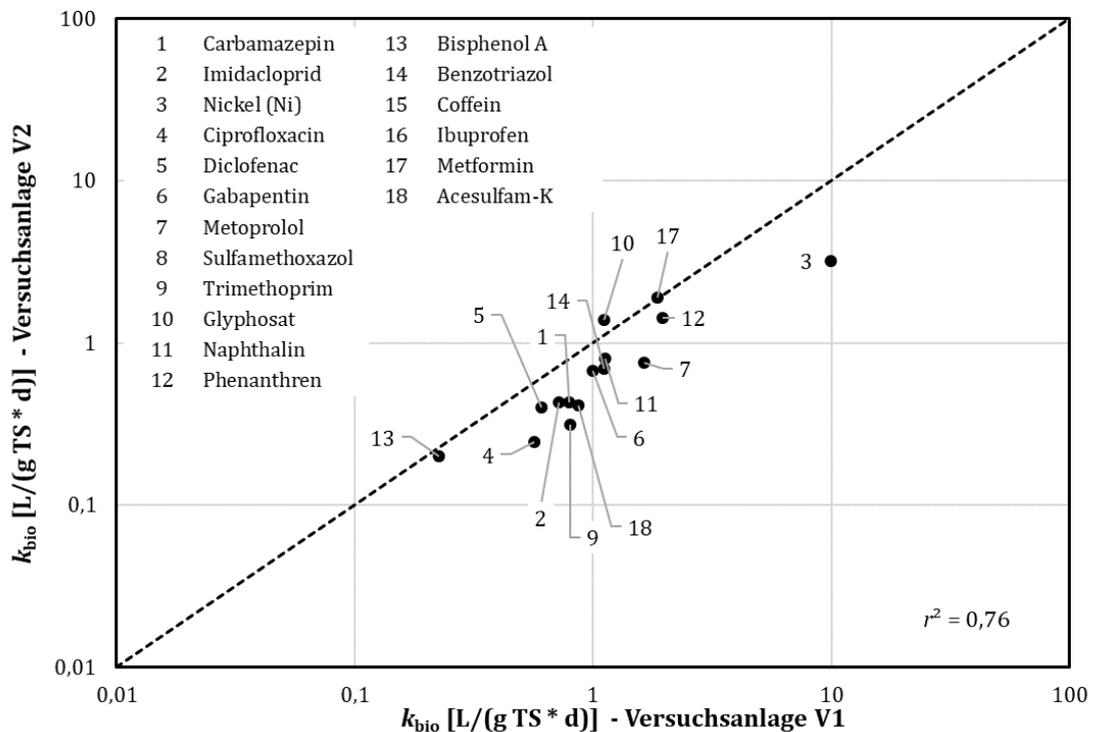
Abbildung 25 stellt die für die einzelnen Spurenstoffe ermittelten Biodegradationskonstanten  $k_{\text{bio}}$  für beide Versuchsanlagen gegenüber. Es wird deutlich, dass der biologische Abbau in der Versuchsanlage V2 geringer als in der Versuchsanlage V1 war (qualitativ auch in Abbildung 24 erkennbar). Dieses könnte bautechnische oder konstruktive Ursachen haben, die z. B. eine unterschiedliche Sauerstoff-Verteilung in den Nitrifikationszonen oder ungleiche Absetzbedingungen in der Nachklärung zur Folge hätten. Diese Gründe können allerdings ausgeschlossen werden. Vielmehr ist hier erkennbar, dass beide Versuchsanlagen unterschiedlich beschickt wurden, was sich in den unterschiedlichen Betriebsparametern (Abs. 3.3 mit Tabelle 7) äußert. Der spezifische Einfluss dieser Betriebsparameter auf den Rückhalt von Vertretern der verschiedenen Stoffgruppen wird in den folgenden Unterkapiteln diskutiert. Die Daten sind in **Anhang 4** hinterlegt.

<sup>11</sup> Beachte hierzu auch den Bias zwischen dynamisch ermittelten Biodegradationskonstanten  $k_{\text{bio,dyn}}$  und solchen aus Batch-Versuchen  $k_{\text{bio}}$  (Abs. 2.1).



**Abbildung 24: Zusammenstellung der ermittelten dynamischen Biodegradationskonstanten  $k_{bio,dyn}$  für beide Versuchsanlagen.**

Dargestellt sind Medianwert über alle vier Messwochen, sowie Minimal- und Maximalwerte. Grenzen des biologischen Abbaus ( $k_{bio} = 0,1$  und  $10,0$  L/(g TS \* d)) nach Stoffgruppen-Einteilung (s. Tabelle 2, Abs. 2.6 mit weiteren Nachweisen). Für fehlende Stoffe konnten keine Daten erhoben werden.



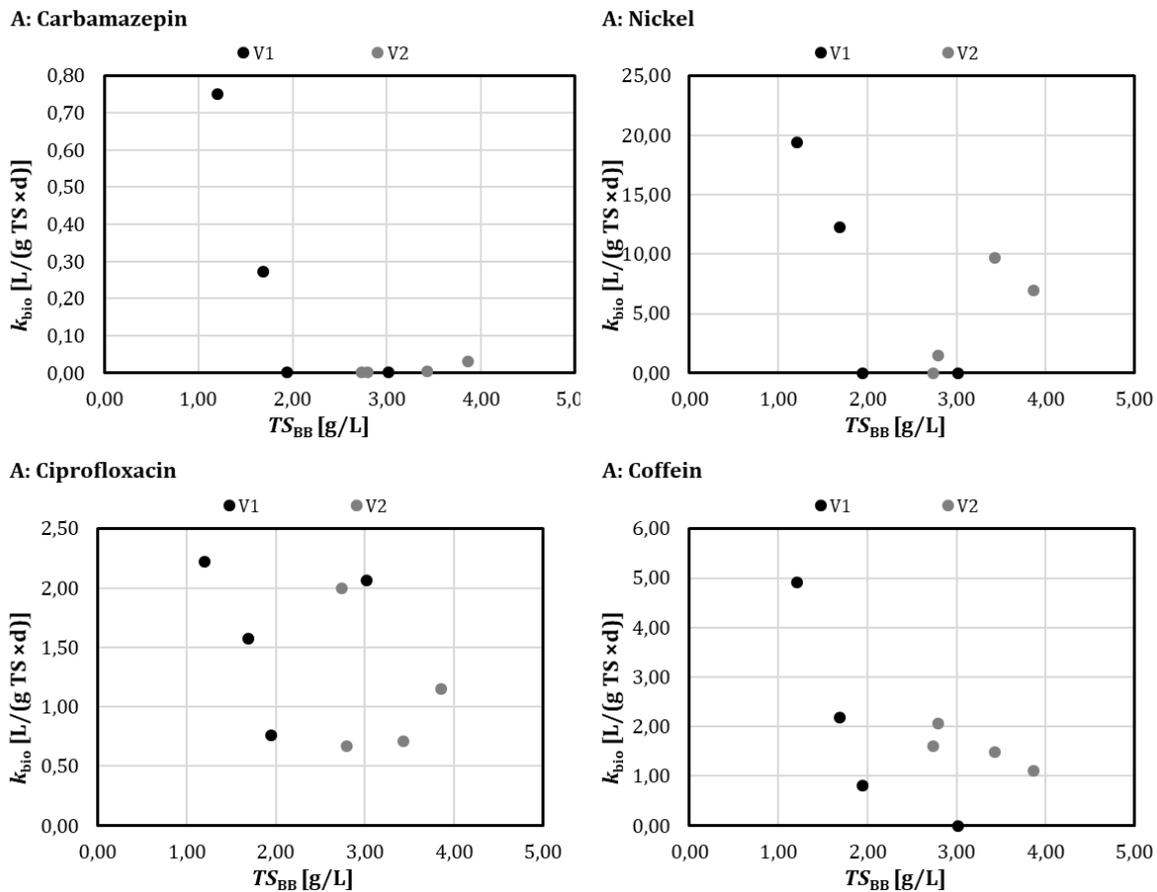
**Abbildung 25: Gegenüberstellung der Biodegradationskonstanten beider Versuchsanlagen**

Dargestellt sind Medianwerte aller Messwochen beider Versuchsanlagen. Für fehlende Stoffe konnten keine Daten erhoben werden. Gestrichelte Linie ist eine Ursprungsgerade mit der Steigung 1.

#### 4.4.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung

Ein verbesserter Rückhalt von Spurenstoffen wird durch geringfügige Änderungen der Biomassephysiologie und / oder der Biomassemenge zwischen verschiedenen Belebtschlamm-biozöten erklärt. Daher wird im Folgenden der spezifische Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung ( $TS_{BB}$ ) diskutiert (vgl. hierzu Anhang 4.1 und 4.2.1).

Es lässt sich kein systematischer Einfluss einer Änderung des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung auf die Vertreter der **Stoffgruppe I (Carbamazepin und Imidacloprid)** erkennen (Abbildung 26A). Das äußert sich auch in gegensätzlichen Korrelationskoeffizienten (für Carbamazepin:  $r^2 = -0,79$  und  $+0,89$  bei Versuchsanlagen V1 und V2, vgl. hierzu auch die Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten in Tabelle 21, Abs. 4.4.4).



**Abbildung 26: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung.**

A: Stoffgruppe I, Carbamazepin, B: Stoffgruppe II, Nickel, C: Stoffgruppe III, Ciprofloxacin, D: Stoffgruppe V, Coffein. Daten für Stoffgruppe IV nicht verfügbar. Für zugehörige Korrelationskoeffizienten s. Abs. 4.4.4, Tabelle 21).

Auf den biologischen Abbau von Vertretern der **Stoffgruppe II** hat der TS-Gehalt ebenso keinen Einfluss (vgl. Anhang 4.2.1). Ohnehin wird für **Nickel** infolge eines analytischen Problems der biologische Abbau überschätzt (vgl. Abs. 4.2.4), so dass die angegebenen  $k_{bio}$ -Werte (Abbildung 26B) nicht plausibel sind. Die  $k_{bio}$ -Werte von **Flouranthren** sind z. T. unerwartet hoch (bis  $k_{bio} = 34,6$  l/(g TS \* d)). Hier ist von einem ähnlichen analytischen Problem auszugehen, da solch hohe Werte ansonsten nicht vorkommen.

Die Korrelation zwischen dem  $k_{bio}$ -Wert und dem TS-Gehalt ist für die Vertreter der **Stoffgruppe III** nicht einheitlich und nicht aussagekräftig (exemplarisch Abbildung 26C für

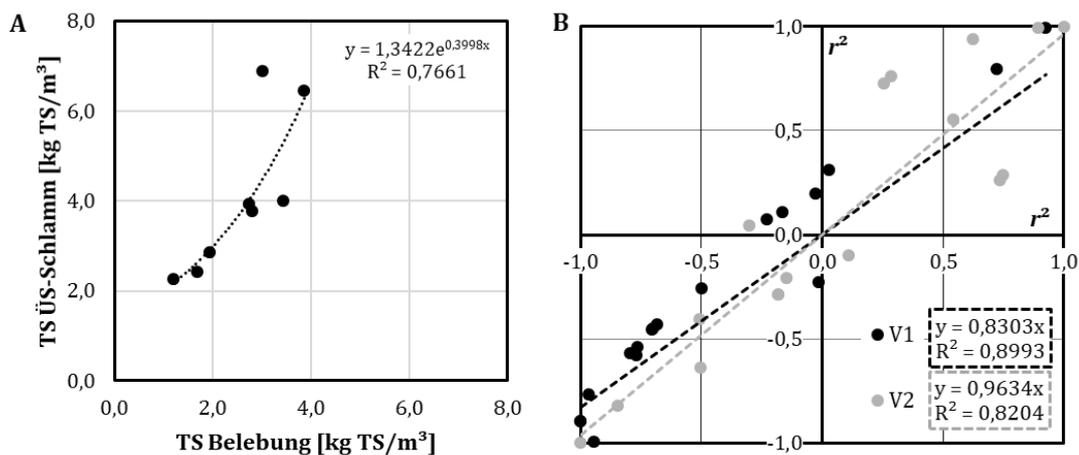
Ciprofloxacin mit  $r^2 = 0,03$  bzw.  $-0,30$ , weitere Beispiele in Anhang 4.2.1, für die Korrelationskoeffizienten s. Abs. 4.4.4 mit Tabelle 21). Es lässt sich somit aus den Daten kein Trend ableiten.

Wie die Zusammenstellung der Daten in Anhang 4.2.1 zeigt, ist für die Vertreter der Stoffgruppe keine einheitliche Tendenz erkennbar, ob der  $k_{\text{bio}}$ -Wert sich mit dem TS-Gehalt in der Belebung ändert. Letztere variierten zwischen 1,7 und 3,9 kg TS/m<sup>3</sup> und lagen damit in einem für den Betrieb der meisten Belebungsanlagen üblichem Bereich. Es zeigt sich, dass innerhalb dieses Wertebereichs der TS-Gehalt keinen Einfluss auf den biologischen Abbau (von Vertretern der Stoffgruppe III) hat. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Beobachtungen der ersten Projektphase<sup>12</sup>. Gleiches lässt sich für die gut bzw. sehr gut biologisch abbaubaren Substanzen der **Stoffgruppe V** feststellen (exemplarisch Abbildung 26D).

Für Vertreter der **Stoffgruppe IV** konnten keine Daten erhoben werden. Da sie sich bezüglich der Abbaubarkeit wie die Stoffgruppe III verhalten, ist davon auszugehen, dass die Variation des TS-Gehaltes in der Belebung in den o. g. Grenzen keinen Einfluss auf den biologischen Abbau hat. Ein Einfluss auf die infolge Sorption entfernten Substanzen aus Stoffgruppe IV ist allerdings nachweisbar (vgl. Abs. 4.3.1 und Tabelle 20 in Abs. 4.3.5).

#### 4.4.2 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm

Während der Versuchsdurchführung wurden Trockensubstanzgehalte im Überschussschlamm von 2,2 bis 6,5 kg TS/m<sup>3</sup> realisiert. Neben der abgezogenen Schlammmasse stellt sich dieser in erster Linie in Abhängigkeit von der Geometrie der Nachklärung ein. Folglich liegt für den Zusammenhang zwischen den TS-Gehalten in Belebung und Überschussschlamm eine hohe Korrelation vor, die am besten durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann und die bei konstanten Betriebsbedingungen anlagenspezifisch ist (Abbildung 27A). Konsequenterweise verhält sich der biologische Abbau ähnlich, wie es auf Basis der hohen Korrelation zwischen den Korrelationskoeffizienten für die  $k_{\text{bio}}$ -Werte in Abhängigkeit der TS-Gehalte im Belebtschlamm und im Überschussschlamm deutlich wird (Abbildung 27B).



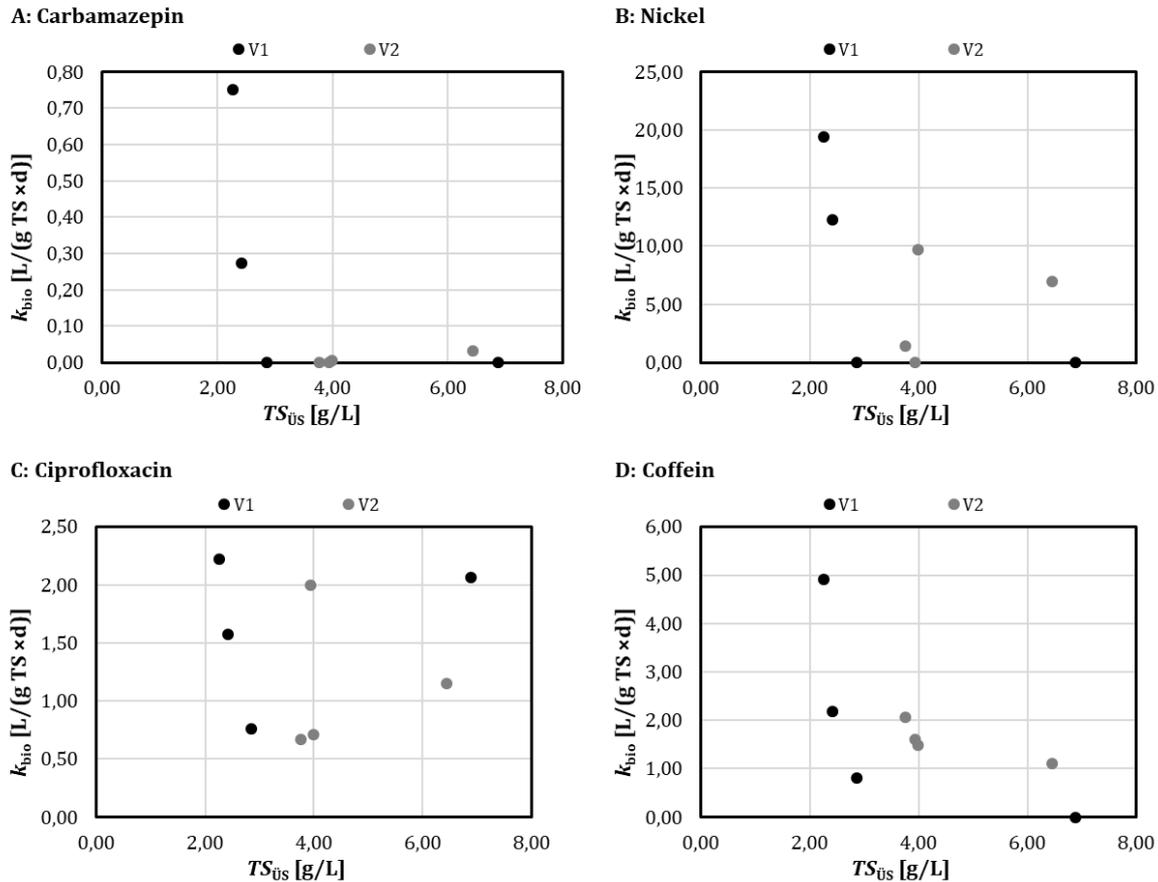
**Abbildung 27: Ähnlichkeit der Betriebsparameter. A: Abhängigkeit der TS-Gehalte im Überschussschlamm und in der Belebung. B: Korrelation der Korrelationskoeffizienten.**

Gegenübergestellt für die beiden Versuchsanlagen V1 und V2. Korrelationskoeffizienten für (B) nach Tabelle 21 für die Betriebsparameter  $TS_{\text{BB}}$  und  $TS_{\text{ÜS}}$ .

Folglich gelten die Ausführungen zum Einfluss des TS-Gehaltes hier sinngemäß: Es lässt sich innerhalb der realisierten TS-Gehalte keine Beeinflussung des biologischen Abbaus (impliziert über die ermittelten  $k_{\text{bio}}$ -Werte) feststellen (Abbildung 28). Dass es einen Zusammenhang zwischen den TS-Gehalten gem. Abbildung 27 gibt, lässt sich auch daran erkennen, dass sich die

<sup>12</sup> Vgl. Abs. 6.1.1/ Einfluss Betriebsparameter, dort mit Abbildung 10B, im Vollbericht zur 1. Projektphase.

linearen Korrelationskoeffizienten (4.4.4 mit Tabelle 21) parallel zueinander bzw. gemeinsam miteinander verschieben. Sehr wohl ist aber ein Einfluss auf die Sorptionsrate nachweisbar (vgl. Abs. 4.3.2 und 4.3.5 mit Tabelle 20).



**Abbildung 28: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm.**

A: Stoffgruppe I, Carbamazepin, B: Stoffgruppe II, Nickel, C: Stoffgruppe III, Ciprofloxacin, D: Stoffgruppe V, Coffein. Daten für Stoffgruppe IV nicht verfügbar. Für zugehörige Korrelationskoeffizienten s. Abs. 4.4.5, Tabelle 20).

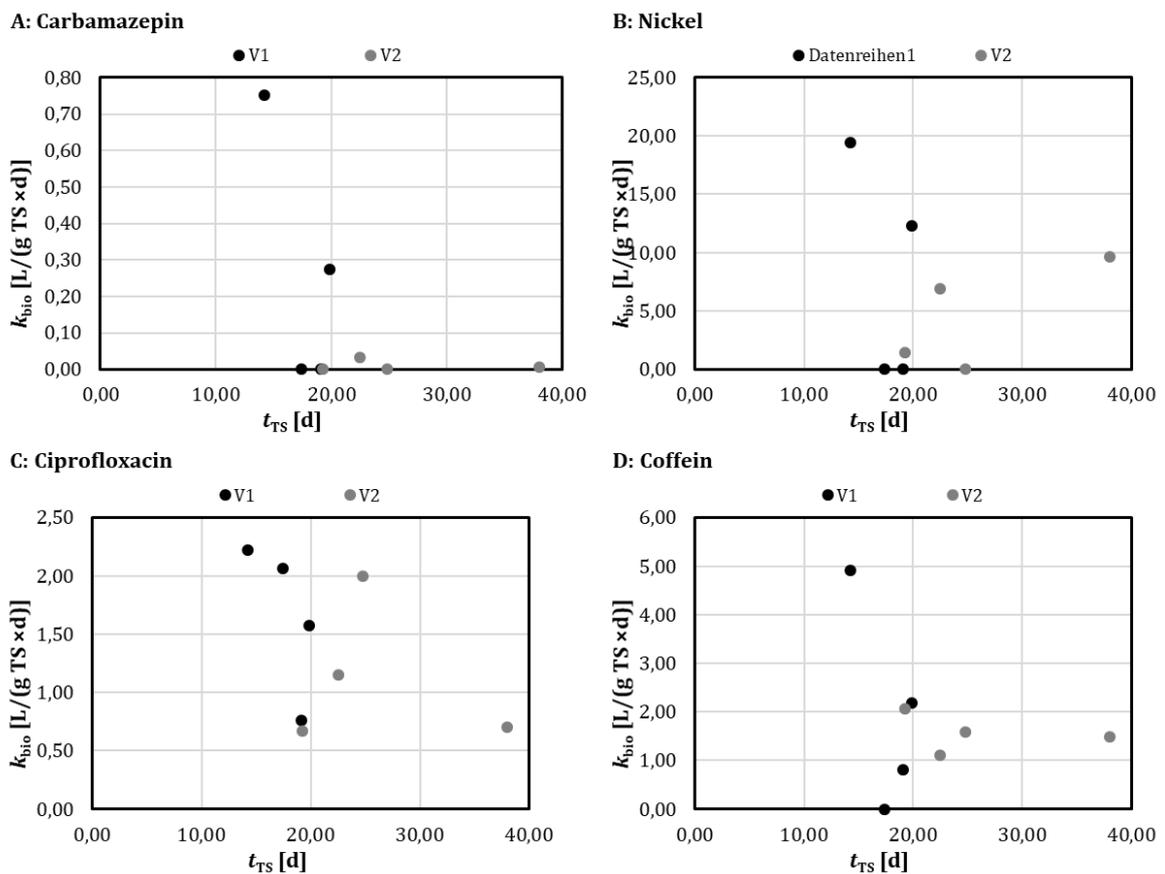
### 4.4.3 Einfluss des Schlammalters und der Schlammbelastung

Das Schlammalter ist ein Betriebsparameter, der unmittelbar mit der mikrobiellen Wachstumsaktivität zusammenhängt. Das mikrobielle Wachstum nimmt mit zunehmendem biologisch abbaubarem CSB im Rohabwasser zu. Mit zunehmendem Schlammalter nimmt die Biomasseproduktion ab (aufgrund des endogenen Metabolismus). Da weniger Biomasse produziert wird, ist auch die mikrobielle Aktivität gering. Es muss weniger Überschussschlamm abgelassen werden, um das Schlammalter  $t_{TS}$  zu erhöhen. Wenn weniger Schlamm abgelassen wird, wird die Gesamtbio­masse im Belebungs­becken für eine bestimmte Zeit erhöht. Wenn die Gesamtbio­masse erhöht wird, verringert sich die Schlamm­belastung. Infolgedessen nimmt der Anteil der heterotrophen Bakterien allmählich ab, während die Autotrophen unter Ausnutzung vorhandener Elektronendonatoren zuzunehmen beginnen. Ihre Teilungsraten sind jedoch niedriger als die von heterotrophen Bakterien. Somit ist der autotrophe Anteil im Schlamm immer noch geringer als der Anteil an heterotrophen.

Angesichts dieser Abhängigkeit von mikrobieller Wachstumsaktivität und Schlammalter treten daher die höchsten Anteile an aktiven Heterotrophen bei niedrigen Schlammalter auf.

Dieses würde plausible Befunde erklären, die auf eine schnellere Entfernung von Spurenstoffen bei niedrigen Schlammalter hinweisen und die o.g. Befunde erklären.

In dieser Versuchsreihe war das Schlammalter in der zweiten Modellanlage V2 vergleichsweise hoch, jedoch ist die Schlammbelastung erheblich geringer als in V1. Dieses kann ein Grund für die kleineren  $k_{\text{bio}}$ -Werte in V2 sein. Daraus würde folgen, dass Belebungsanlagen mit geringem Schlammalter und hoher Schlammbelastung eine bessere Elimination ermöglichen. Dieses Phänomen ist in erster Linie für Vertreter der **Stoffgruppe II** relevant (z. B. Ciprofloxacin, Abbildung 29C, weitere Beispiele s. Anhang 4.2.3). Ähnliches Verhalten wurde für Gabapentin, Metoprolol, Trimethoprim, Bisphenol-A und Benzotriazol beobachtet. Für diese Substanzen wäre zu prüfen, ob sie (überwiegend) durch heterotrophe Bakterien metabolisiert werden können.



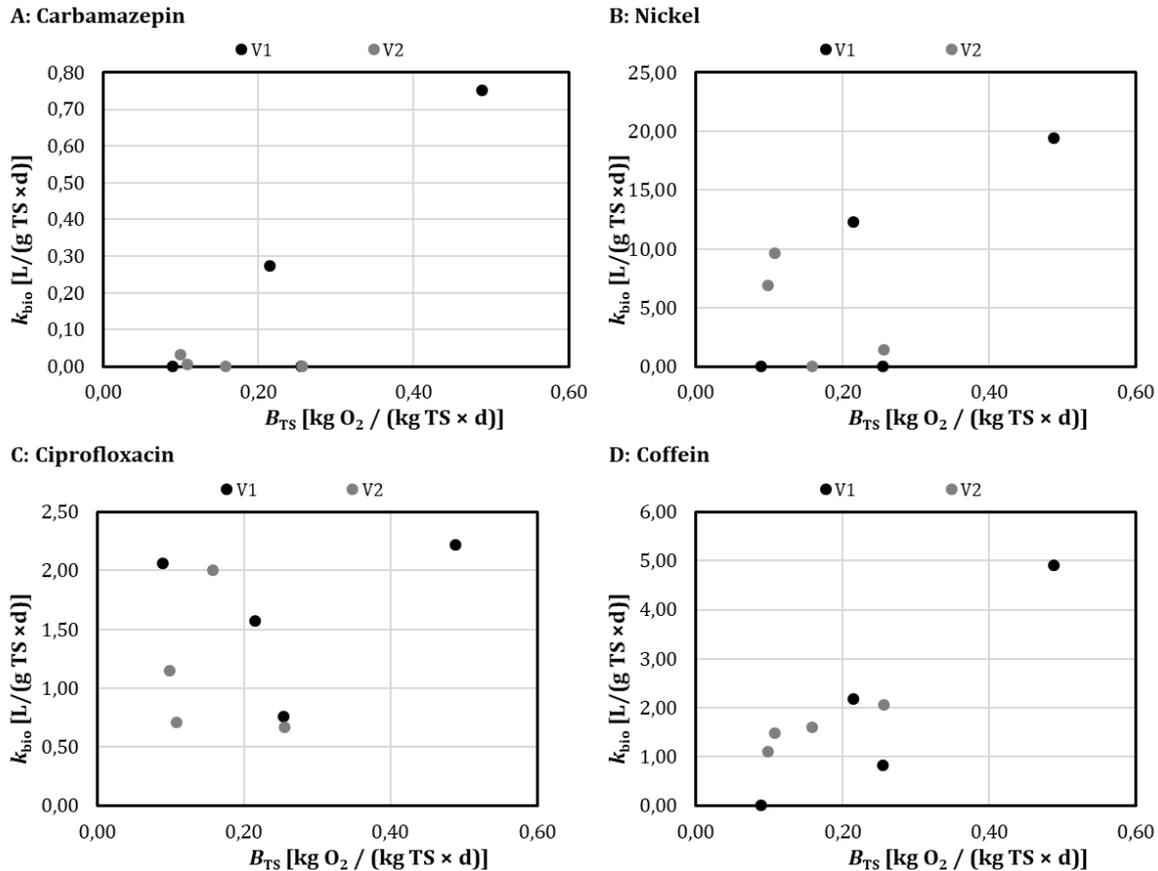
**Abbildung 29: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit des Schlammalters.**

A: Stoffgruppe I, Carbamazepin, B: Stoffgruppe II, Nickel, C: Stoffgruppe III, Ciprofloxacin, D: Stoffgruppe V, Coffein. Daten für Stoffgruppe IV nicht verfügbar. Für zugehörige Korrelationskoeffizienten s. Abs. 4.4.4, Tabelle 21).

Auf die Vertreter der Stoffgruppen **I und II**, die als nicht biologisch abbaubar gelten, hat eine Änderung des Schlammalter keinen Einfluss (Abbildung 31A und B). Bezüglich der in Abbildung 31B dargestellten Daten für Nickel wird auf die analytischen Problem bei diesem Schwermetall hingewiesen (Abs. 4.2.4). Es ist daher keine Beeinflussung des biologischen Abbaus für diese Stoffgruppe feststellbar. Für die Vertreter der **Stoffgruppe V** lässt sich kein einheitlicher Trend ableiten.

Schlammalter und Schlammbelastung sind gegenläufig (s.o.). Die  $k_{\text{bio}}$ -Werte für die Schlammbelastung verhalten sich daher prinzipiell umgekehrt zu den für das Schlammalter

diskutierten. Bei vielen Spurenstoffen lässt sich eine positive Korrelation zwischen Schlammbelastung und  $k_{\text{bio}}$ -Werten ausmachen (Abbildung 30C und D, vgl. auch Abs. 4.4.4 mit Tabelle 21). Dieses würde darauf hindeuten, dass der biologische Abbau bei hoher Schlammbelastung effizienter ist (trifft auf Modellkläranlage V1 mehr zu als auf V2). Dieses Muster wäre eigentlich nur für sehr gut abbaubare Substrate (**Stoffgruppe V**) zu vermuten. Tatsächlich wäre für die meisten Spurenstoffe mit einem gegensätzlichen Verhalten zu rechnen, wie es auch die Ergebnisse der 1. Projektphase nahelegen<sup>13</sup>. Auffällig ist auch, dass in beiden Versuchsanlagen kein einheitliches Muster erkennbar ist.



**Abbildung 30: Biodegradationskonstanten in Abhängigkeit der Schlammbelastung.**

A: Stoffgruppe I, Carbamazepin, B: Stoffgruppe II, Nickel, C: Stoffgruppe III, Ciprofloxacin, D: Stoffgruppe V, Coffein. Daten für Stoffgruppe IV nicht verfügbar. Für zugehörige Korrelationskoeffizienten s. Abs. 4.4.4, Tabelle 21.

#### 4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zum biologischen Abbau

Es konnte keine Abhängigkeit des biologischen Abbaus vom Trockensubstanzgehalt festgestellt werden (vgl. Tabelle 21). Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da nicht die Menge an Schlamm, sondern die Art der im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen den biologischen Abbau bestimmen. Der relativ allgemeine Parameter TS-Gehalt unterscheidet nicht nach heterotrophen oder autotrophen Bakterien und umfasst auch inaktive bzw. anorganische Masse. Die Größe ist daher nur sehr begrenzt geeignet, die biologische Aktivität hinsichtlich des Abbaus einzelner Spurenstoffe im Belebungsbecken zu prognostizieren.

<sup>13</sup> Vgl. Abs. 6.1.1. mit Abbildung 10, Vollbericht zur 1. Projektphase.

**Tabelle 21: Lineare Korrelationskoeffizienten  $r^2$  für die Korrelation der Biodegradationskonstanten  $k_{bio}$  mit unterschiedlichen Betriebsparametern.**

Hohe Korrelationskoeffizienten deuten auf einen linearen Zusammenhang hin, der gegenläufig (negativ) oder gleichgerichtet (positiv) sein kann.  $TS_{BB}$  = Trockensubstanzgehalt in der Belebungsstufe,  $TS_{Üs}$  = Trockensubstanzgehalt im Überschussschlamm,  $t_{TS}$  = Schlammalter,  $B_{TS}$  = Schlammbelastung.

		$TS_{BB}$ [g TS/L]		$TS_{Üs}$ [g TS/L]		$t_{TS}$ [d]		$B_{TS}$ [kg O2/kgTS*d]		
		V1	V2	V1	V2	V1	V2	V1	V2	
<b>I</b>	Carbamazepin	-0,79	0,89	-0,57	0,99	-0,74	-0,14	0,89	-0,62	
	Imidacloprid	-0,23	0,11	0,07	-0,10	-0,99	0,74	0,60	-0,70	
<b>II</b>	Nickel (Ni)	-0,95	0,73	-0,99	0,26	-0,70	0,85	0,69	-0,93	
<b>III</b>	Ciprofloxacin	0,03	-0,30	0,31	0,04	-0,71	-0,20	0,21	-0,19	
	Diclofenac	-0,02	-0,51	-0,23	-0,40	0,39	-0,56	-0,03	0,93	
	Gabapentin	-0,77	0,75	-0,58	0,29	-0,57	0,63	0,76	-0,50	
	Metoprolol	-0,70	-0,15	-0,45	-0,21	-0,80	-0,34	0,84	0,70	
	Sulfamethoxazol	-0,77	0,62	-0,54	0,94	-0,84	-0,55	0,95	-0,30	
	Trimethoprim	-0,71	0,54	-0,46	0,55	-0,83	0,36	0,86	-0,91	
	Glyphosat	0,93	-0,50	0,99	-0,64	-0,03	-0,14	-0,71	0,82	
	Naphthalin	-0,50	-1,00	-0,26	-1,00	-0,94	-1,00	0,84	1,00	
	Phenanthren	-0,16	0,26	0,11	0,73	-0,98	-0,83	0,59	0,05	
	Bisphenol A	-0,68	-0,18	-0,43	-0,29	-0,82	-0,99	0,84	0,78	
	Benzotriazol	-0,97	-0,18	-0,77	-0,29	-0,98	-0,99	0,97	0,78	
	<b>V</b>	Coffein	-1,00	-0,85	-0,90	-0,82	-0,90	-0,28	0,89	0,94
Ibuprofen		0,72	1,00	0,80	1,00	0,08	1,00	-0,68	-1,00	
Metformin		-1,00	-0,01	-0,89	-0,12	-0,90	0,60	0,89	-0,62	
Acesulfam-K		-0,03	0,29	0,20	0,76	-0,87	-0,75	0,48	-0,10	
Legende [ $r^2$ ]:		-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0				

Nur wenige Stoffe weisen steigende  $k_{bio}$ -Werte mit zunehmenden Schlammalter auf (Tabelle 21, dort positive Korrelationskoeffizienten). Dazu zählen z. B. Diclofenac (nur V1) oder Ibuprofen (V1 und V2). Vielmehr zeigt die Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem Schlammalter und den  $k_{bio}$ -Werten für die meisten Spurenstoffe eine negative Korrelation (vgl. hierzu auch Anhang 4.2.3). Das heißt, dass mit zunehmenden Schlammalter ein schlechterer biologischer Abbau einhergehen würde. Dieses widerspricht den Ergebnissen der 1. Projektphase<sup>14</sup> und den wissenschaftlichen Ergebnissen anderer Studien (z. B. Kreuzinger et al. 2004; Clara et al. 2005; Joss et al. 2006; Stasinakis et al. 2010), die nicht infrage zu stellen sind. Da die Ergebnisse dieser Studie auf den  $k_{bio,dyn}$ -Werten basieren, sind die Ergebnisse bzgl. des Schlammalters nur bedingt zu vergleichen. Das Schlammalters in Batch-Versuchen ist nicht präzise zu ermitteln.

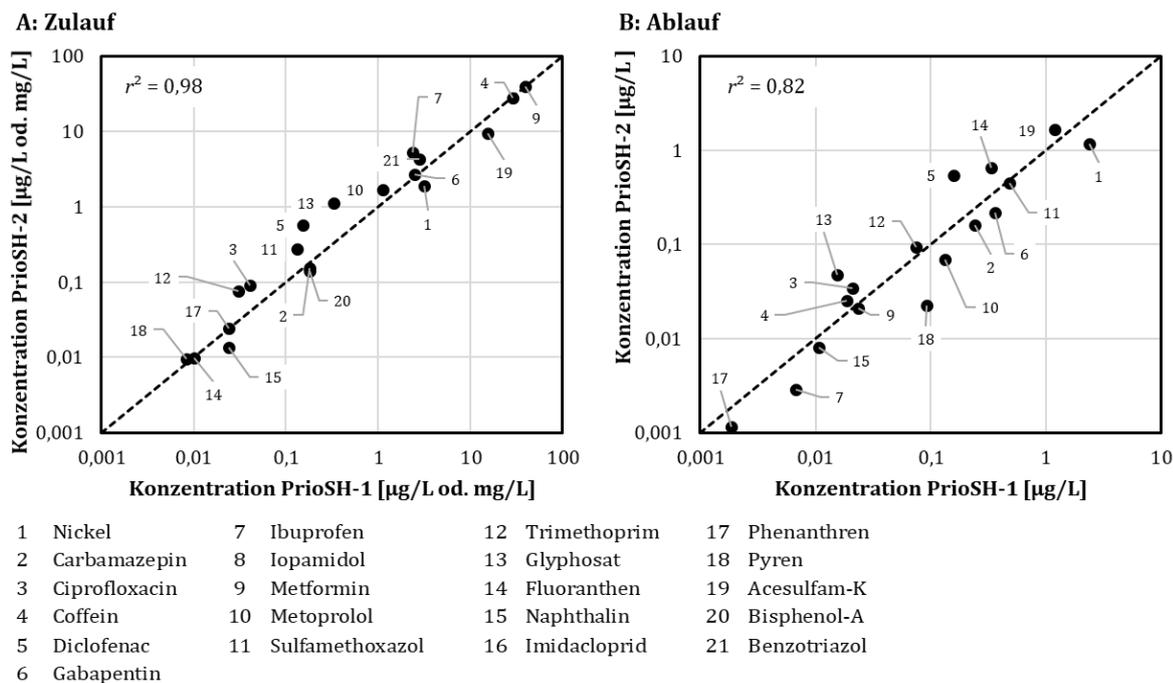
Jones et al. (2007) führen aus, dass sich korrespondierend zum Schlammalter eine entsprechende Belebtschlamm-Biozönose ausbildet, die insbesondere für einen enzymatischen Abbau erforderlich ist (s. a. Zwiener et al. 2000). Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Versuchsreihe hatte u. a. zum Ziel, den spezifischen Einfluss unterschiedlicher Betriebsparameter zu ermitteln. Dafür wurden wochenweise die Stellgrößen angepasst (Abs. 3.3 mit Tabelle 6). Vor den eigentlichen Messwochen wurden die Modellkläranlagen mit diesen konstanten Stellgrößen betrieben. Während der Messwochen wurden dann die Betriebsparameter (u.a. Schlammalter als Quotient der im System vorhandenen Schlammmasse und abgezogener Schlammmasse) bestimmt. Die Schlammalter wurden auf diese Weise mehrmals wöchentlich ermittelt und für die Korrelation den  $k_{bio}$ -Werten gegenübergestellt (s.a. Abbildung 29).

Es ist möglich, dass sich während dieser Zeit, die Belebtschlamm-Biozönose noch nicht passend zu den aktuellen Stellgrößen angepasst hat. Wahrscheinlich führt dieser Zusammenhang dazu, dass der biologische Abbau in unseren Versuchsreihen mit zunehmender Schlammalter abnimmt. Inwieweit dieser Zusammenhang auf die Ergebnisse dieser Studie zutrifft bleibt offen.

<sup>14</sup> Vgl. Abs. 6.1.1. mit Abbildung 10, Vollbericht zur 1. Projektphase.

### 4.5 Vergleich der Ergebnisse beider Projektphasen

Der Vergleich der in der vorliegenden Projektstudie festgestellten Konzentrationen mit den in der vorherigen Projektphase bestimmten, kann die Konsistenz der Messergebnisse belegen (Abbildung 31). Für die Zulaufproben wurden berücksichtigt, dass die Proben aus dem Ablauf der Grobentschlammung (zugleich Zulauf zur Belebung) genommen wurden. Diese Proben des aktuellen Projektes entsprechen denen des sog. Sondermessprogramms der vorherigen Projektphase<sup>15</sup>. Entsprechend wurden für die Ablaufproben Probenahmepunkte am Klarwasserablauf der Nachklärungen einbezogen. Anhang 5 stellt die Ergebnisse für alle Spurenstoffe im Detail gegenüber.



**Abbildung 31: Vergleich der Konzentrationen aus beiden Projektphasen.**

Berücksichtigt sind die Stoffkonzentrationen im Zulauf zur Belebung bzw. Ablauf der Grobentschlammung (A) sowie der Ablauf der Nachklärung (B). Daten aus PrioSH-1 basieren auf Sondermessprogramm (Ratzeburg und Bad Segeberg). Daten aus PrioSH-2 berücksichtigen beide Messwochen der Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorption (jeweils Medianwerte). Für fehlende Stoffe konnten keine Daten erhoben werden. Konzentrationen von Nickel im Zulauf in [mg/L]. Alle anderen Konzentrationen in [µg/L].

Der Probenzeitraum für beide Datenreihen ist vergleichbar (PrioSH-1: August, PrioSH-2: Oktober, so dass saisonale Einflüsse unwahrscheinlich sind<sup>16</sup>). Die Einzugsgebiete der drei für diesen Vergleich berücksichtigten Kläranlagen (PrioSH-1: Bad Segeberg, Ratzeburg, PrioSH-2: Reinfeld) ist in Größe, Anschlussgröße und Struktur vergleichbar (überwiegend Trennsystem, 10.000 bis 40.000 Einwohnerwerte, keine nennenswerte Industrie). Folglich lässt sich für die Zulaufproben eine sehr hohe Korrelation ableiten ( $r^2 = 0,98$ ). Dieses verdeutlicht, die Übertragbarkeit der Analyseergebnisse<sup>17</sup>. Da auf allen hier betrachteten Kläranlagen eine

<sup>15</sup> Vgl. Abs. 3.1 des Vollberichts zur 1. Projektphase. Es wurden daher nur Werte der KA Bad Segeberg und Ratzeburg für diese Gegenüberstellung berücksichtigt.

<sup>16</sup> Saisonale Unterschiede können sowohl hinsichtlich der Zulaufkonzentration als auch hinsichtlich der Eliminationsleistung auftreten (vgl. Abs. 8 des Vollberichts zur 1. Projektphase).

<sup>17</sup> Es sei erwähnt, dass der ermittelte Korrelationskoeffizient aufgrund des großen Wertebereichs der berücksichtigten Konzentration von 0,01 bis über 50 µg/L (fast 5 log-Stufen) aufgrund der Berechnungsweise naturgemäß etwas größer ausfällt, als bei einem engeren Wertebereich.

vergleichbare Verfahrenstechnik zwischen den Probenahmepunkten vorliegt (Belebtschlammverfahren als vorgeschaltete oder Kaskadendenitrifikation mit Nachklärung), kann auch für die Ablaufproben eine hohe Korrelation ( $r^2 = 0,82$ ) registriert werden.

Diese Betrachtungen passen zum Abgleich der Daten aus der ersten Projektphase mit den Daten des Bundesmonitoring sowie der daraus abgeleiteten Prognose<sup>18</sup>. Die Daten aller Untersuchungen sind somit übertragbar und vergleichbar.

---

<sup>18</sup> Vgl. Abs. 6.6 des Vollberichts zur 1. Projektphase.

## 5 Diskussion

### 5.1 Überprüfung der Stoffgruppen-Einteilung

Basierend auf den Versuchsreihen, die vorrangig zur Bestimmung der Sorption (Abs. 3.2 und 4.3) und der biologischen Abbaubarkeit (Abs. 3.3 und 4.4) konzipiert waren, konnten jeweils die Sorptionskoeffizienten  $k_d$  (Formel 5, Abs. 2.2) und die Biodegradationskonstante  $k_{\text{bio,dyn}}$  (Formel 1b, Abs. 2.1) bestimmt werden. Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten gegenübergestellt, um die Richtigkeit der Zuordnung der Substanzen zu den Stoffgruppen (nach Tabelle 2, Abs. 2.6) zu überprüfen. Die in den Graphen dargestellten Grenzen zwischen den Stoffgruppen folgen den Empfehlungen aus der Literatur (s. hierzu die Ausführungen in Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen).

Es zeigt sich, dass die Zuordnung zu den Stoffgruppen, die im Rahmen der 1. Projektphase erfolgte<sup>19</sup>, weitgehend korrekt ist. Allein das PAK Phenanthren sollte aufgrund einer deutlichen Sorptionsneigung der Stoffgruppe IV zugeordnet werden (vorher III).

#### 5.1.1 Stoffgruppe I (nicht abbaubare, nicht sorptive Stoffe)

Die bisherige Zuordnung der Substanzen zur Stoffgruppe I ist weitgehend zutreffend (Abbildung 32). Arzneistoffe sind pharmakologisch aktiv und häufig nicht abbaubar. Diese Verbindungen sind in wässrigem Medium hochpersistent, da sie große Komplexe mit unterschiedlichem Molekulargewicht, Struktur, Funktionalität und Form bilden können. Sie können auch als polare Moleküle mit mehr als einer ionisierbaren Gruppe charakterisiert werden. **Carbamazepin** und **Iopamidol** sind Wirkstoffe, die bei der Abwasserbehandlung weder abgebaut noch adsorbiert werden.

**Iopamidol** war nur in seltenen Fällen nachweisbar bzw. auswertbar. Dennoch scheint sicher, dass Sorption ausgeschlossen werden kann ( $k_{d,\text{max}} < 200 \text{ L/kg TS}$ ). Ein biologischer Abbau findet kaum statt ( $k_{\text{bio,max}} = 0,15 \text{ L/(g TS * d)}$ )

Eine schlechte Entfernung von **Carbamazepin** kann auf seine physikochemischen Eigenschaften wie Molekülstruktur und Hydrophilie zurückgeführt werden. Da eine Sorption vernachlässigbar ist, hängt die Entfernung von Carbamazepin von seiner biologischen Abbaubarkeit ab, die von seinen molekularen Eigenschaften bestimmt wird. Im Allgemeinen sind einfach strukturierte Arzneistoffe, insbesondere ohne verzweigte / mehrkettige Gruppen, leicht abbaubar. Darüber hinaus sind Arzneistoffe, die eine elektronenziehende funktionelle Gruppe (*electron withdrawing group*, EWG) enthalten (wie Carboxyl-, Halogen- und Amid-Gruppen) gegen biologische Behandlung resistent. In der Tat enthält Carbamazepin eine solche Amid-Gruppe, dies es gegen biologischen Abbau resistent macht. **Carbamazepin** zeigt ebenfalls eine nur geringe Neigung zur Sorption. In Einzelfällen wird jedoch eine mäßige biologische Abbaubarkeit ( $k_{\text{bio}} > 0,1$  bis max.  $0,27 \text{ L/g TS * d}$ ) indiziert, was unter günstigen Betriebsbedingungen ggf. eine Zuordnung zur Stoffgruppe III rechtfertigen könnte (Abbildung 32A). In der Literatur werden max. Konstanten von 0,1 bzw. 0,6  $\text{L/(g TS * d)}$  angegeben<sup>20</sup>.

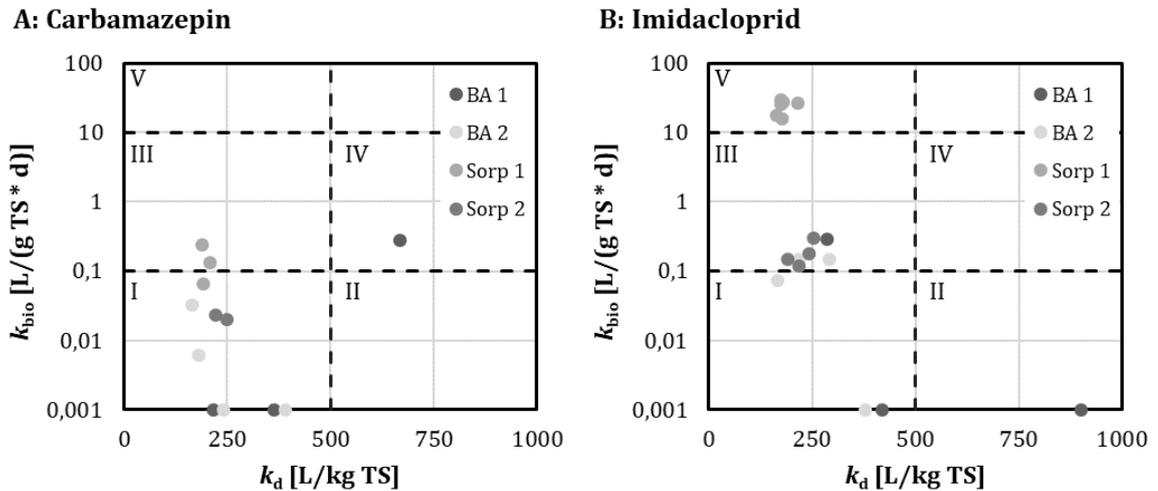
Nicht zur Sorption neigend, aber eine deutliche variierende Abbaubarkeit wird für **Imidacloprid** angezeigt (Abbildung 32B, nicht abbaubar bis sehr gut abbaubar [ $k_{\text{bio,max}} = 20,4 \text{ L/(g TS * d)}$ ], Daten aus Versuchsreihe zur Bestimmung der Sorption). Diese scheint von Faktoren beeinflusst zu werden, die nicht bekannt sind. Referenzwerte aus der Literatur liegen nicht vor. Die z. T. sehr gute Abbaubarkeit von Imidacloprid widerspricht den

<sup>19</sup> Vgl. Abs. 5.1 mit Tabelle 12 im Vollbericht zur 1. Projektphase, hier als Tabelle 2, Abs. 2.6, wiederholt.

<sup>20</sup> Vgl. Anhang 1, Vollbericht zur 1. Projektphase mit weiteren Nachweisen.

Ergebnissen der ersten Projektphase<sup>21</sup>. Es scheint daher eine Zuordnung zur Stoffgruppe III denkbar.

Für die weiteren Vertreter der Stoffgruppe I (**Diuron, Isoproturon, Terbutryn**) konnten keine Daten erhoben werden (Stoffkonzentrationen regelmäßig unterhalb der Bestimmungsgrenzen).



**Abbildung 32: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe I.**

Daten aus den Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Sorp.) und der Abbaubarkeit (BA). Für nicht dargestellte Stoffe oder fehlende Datenpunkte konnten keine Daten erhoben werden. Für die Grenzen zwischen Stoffgruppen I bis V s. Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen.

### 5.1.2 Stoffgruppe II (nicht abbaubare, sorptive Stoffe)

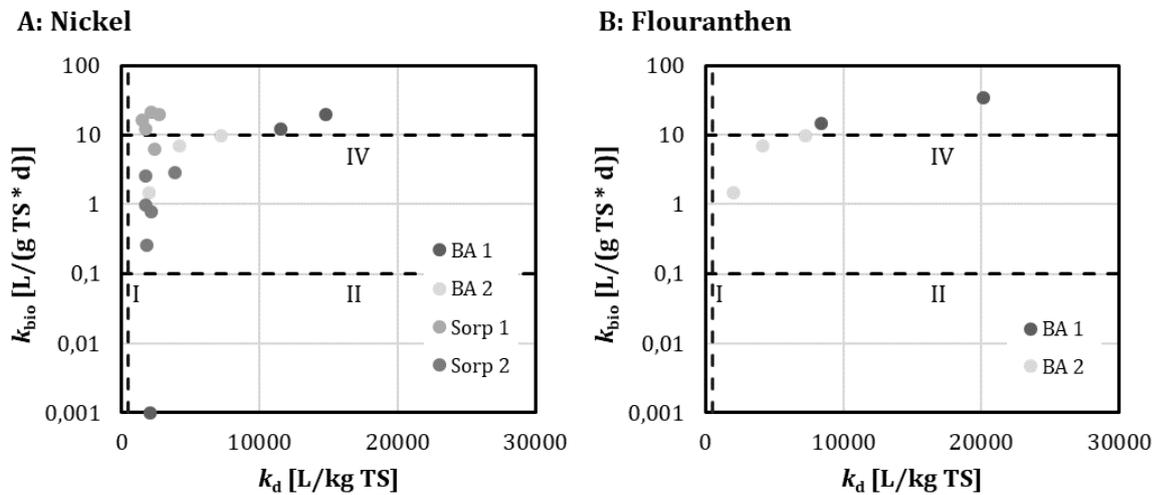
Für die der **Stoffgruppe II** zugeordneten Stoffe, die im Rahmen dieser Studie nachgewiesen werden konnten, sind sehr hohe Sorptionskoeffizienten feststellbar (Nickel:  $k_{d,min} = 1500$  L/kg TS und Flouranthen:  $k_{d,min} = 1915$  L/kg TS, Abbildung 33). Zugleich wird rechnerisch für das Schwermetall **Nickel** ein verhältnismäßig hoher biologischer Abbau angezeigt, was auszuschließen ist. Hier liegt offenbar ein analytisches Problem vor, welches unter Beachtung von Formel 1b (Abs. 2.1) dazu führt, dass Konzentrationen im Ablauf unterschätzt werden und folglich ein nennenswerter biologischer Abbau angezeigt wird.

Für die weiteren Schwermetalle der Stoffgruppe II (**Blei, Cadmium, Quecksilber**) konnten regelmäßig keine  $k_{bio}$ -Werte ermittelt werden, da die Stoffkonzentrationen im Ablauf regelmäßig unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen. Die Sorptionskoeffizienten liegen im erwarteten Bereich ( $k_d > 500$  L/kg TS).

Von den PAK-Vertretern in **Stoffgruppe II** konnte lediglich für Flouranthen regelmäßig  $k_{bio}$ - und  $k_d$ -Werte bestimmt werden (Abbildung 33B). Diese deuten neben einer hohen Sorptionsneigung (s. o.) auch darauf hin, dass ein nennenswerter Anteil biologisch abgebaut wird (Ergebnisse basieren nur auf der Versuchsreihe zur Bestimmung des Abbaus und sind daher ggf. nicht belastbar). Aufgrund der Eigenschaften von **Flouranthen** (vier Benzol-Ringe), wäre prinzipiell von einem nicht nennenswerten biologischen Abbau auszugehen, da die Sorptionsneigung überwiegt und die Substanz daher nicht bioverfügbar ist. Die Zuordnung zur Stoffgruppe II wird daher beibehalten.

<sup>21</sup> Vgl. Abs. 5.4.9 mit Tabelle 39, Vollbericht zur 1. Projektphase.

Für die weiteren Vertreter der Stoffgruppe II konnten keine Daten erhoben werden, da die Stoffkonzentrationen regelmäßig unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen.



**Abbildung 33: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe II.**

Daten aus den Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Sorp.) und der Abbaubarkeit (BA). Für nicht dargestellte Stoffe oder fehlende Datenpunkte konnten keine Daten erhoben werden. Für die Grenzen zwischen Stoffgruppen I bis V s. Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen.

### 5.1.3 Stoffgruppe III (mäßig abbaubare, nicht sorptive Stoffe)

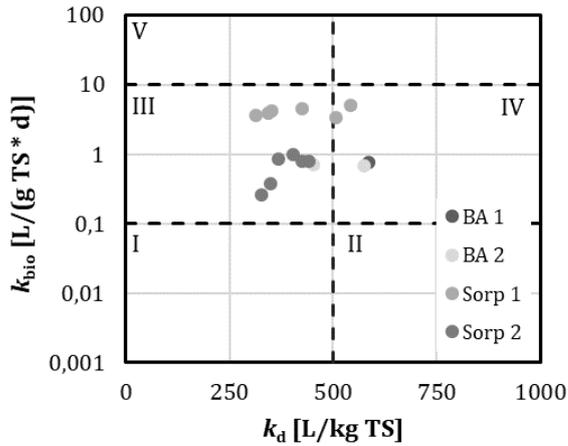
Die Zuordnung der Substanzen zur Stoffgruppe III trifft in den meisten Fällen den richtigen Wertebereich (Abbildung 34 und Abbildung 35). Für einige Stoffe (z. B. Phenanthren) zeigen sich allerdings gegenüber der bisherigen Einteilung (Tabelle 2, Abs. 2.6) Abweichungen.

**Ciprofloxacin** (Abbildung 34A) weist meist eine geringe Sorptionsneigung auf ( $k_d < 500$  L/kg TS). Teils wurden allerdings sehr hohe Sorptionskoeffizienten bestimmt ( $k_{d,max} = 4737$  L/kg TS). Die Abbaubarkeit liegt innerhalb der für die Stoffgruppen II und IV maßgebend Grenzen ( $k_{bio} = 0,26$  bis  $4,98$  L/(g TS \* d)), so dass eine Zuordnung zu beiden Stoffgruppen möglich wäre. Es fällt jedoch auf, dass sich die Verteilung der Sorptionskoeffizienten und Abbauraten in beiden Versuchsreihen deutlich voneinander unterscheiden (Abbildung 34A). Dies kann einerseits an spezifischen Anlagenarten in beiden Versuchsreihen liegen (Versuchskläranlage vs. Modellkläranlage, vgl. Abs. 3.2 und 3.3). Andererseits waren die Ciprofloxacin-Konzentrationen im Rohabwasser in beiden Versuchsreihen unterschiedlich (Mittelwerte:  $0,73 \mu\text{g/L}$  in der Versuchsreihe zur Abbaubarkeit;  $0,42 \mu\text{g/L}$  in der Versuchsreihe zur Sorption). Hohe Konzentrationen führen daher zu einem geringen Abbau und – in diesem Fall – einer relativ höheren Sorption. Vor diesem Hintergrund einer nicht sicheren Sorption ist Ciprofloxacin weiterhin der Stoffgruppe III zuzuordnen.

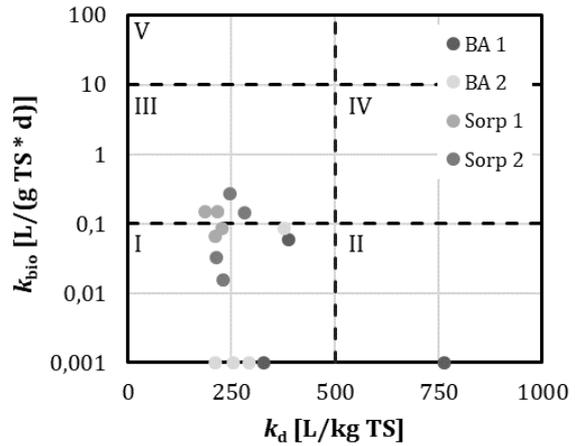
Die Adsorption organischer Substanzen am Belebtschlamm wird durch Hydrophobizität verursacht. Diese ist jedoch aufgrund des niedrigen  $\log K_{OW}$ -Wertes von  $0,28$  [-] von **Ciprofloxacin** nicht relevant. Die Carboxyl-Gruppe und das N4 des Piperazinyl-Rings von Ciprofloxacin können unter verschiedenen pH-Werten Protonen aufnehmen oder abgeben, was die amphotere Natur des Stoffes erklärt (kann als Säure oder Base reagieren). Ciprofloxacin kann somit unter Umweltbedingungen in unterschiedlich geladene Spezies dissoziiert werden. Das Ausmaß der Dissoziation ist ein wichtiger Faktor, der das sorptive Verhalten von Ciprofloxacin im (meist

negativ geladenen) Belebtschlamm beeinflusst. Möglicherweise lassen sich die teils sehr hohen Sorptionskoeffizienten mit diesem Verhalten erklären.

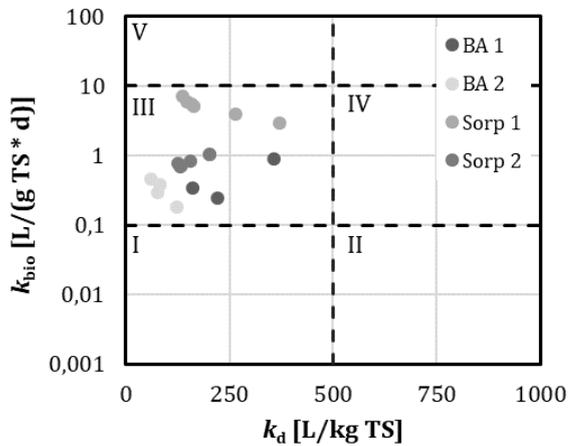
**A: Ciprofloxacin**



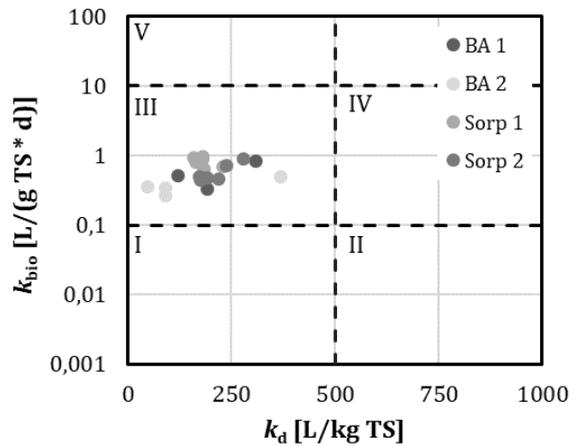
**B: Diclofenac**



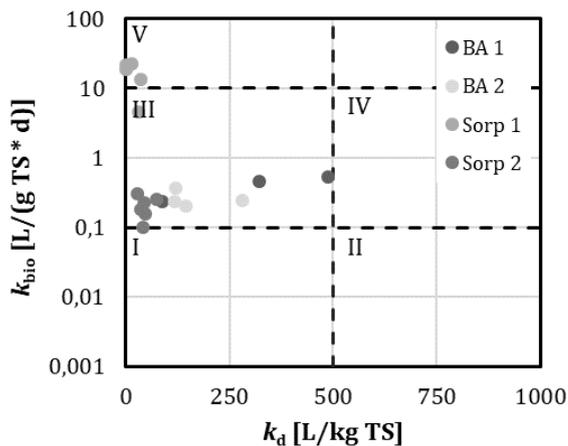
**C: Gabapentin**



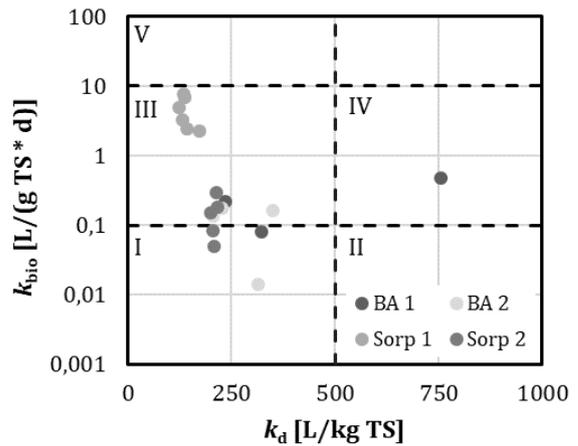
**D: Metoprolol**



**E: Sulfamethazol**



**F: Trimethoprim**



**Abbildung 34: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe III (Teil 1).**

Daten aus den Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Sorp.) und der Abbaubarkeit (BA). Für nicht dargestellte Stoffe oder fehlende Datenpunkte konnten keine Daten erhoben werden. Für die Grenzen zwischen Stoffgruppen I bis V s. Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen.

**Diclofenac** weist zumeist keine Tendenz zur Sorption auf (Abbildung 34B). Bei neutralem pH-Wert wird die Carbonsäure-Gruppe von Diclofenac dissoziiert und folglich wird die Verbindung negativ ionisiert. Daher stößt die Verbindung den negativ geladenen Schlamm (bzw. die negativ geladenen EPS) ab. Die Eliminationsrate von Diclofenac kann folglich durch Verringern des pH-Werts erhöht werden, da Diclofenac bei saurem pH-Wert elektrochemisch neutral wird, wodurch es zur Sorption neigt. Die ermittelten Sorptionskoeffizienten liegen meist in einem Bereich von  $k_d = 158$  bis  $228$  L/kg TS (Ausreißer bis:  $1486$  L/kg TS).

Die Substanz hat sich außerdem als nicht bzw. mäßig biologisch abbaubar erwiesen ( $k_{\text{bio,dyn}} < 0,27$  L/(g TS d), vgl. Abs. 4.4). Diclofenac könnte daher der Stoffgruppe I oder III zugeordnet werden. Übliche  $k_{\text{bio}}$ -Werte für Diclofenac ( $k_{\text{bio}} = 0,5$  bis  $1,2$  L/(g TS \* d), aus: Margot 2015; Tauxe-Wuersch et al. 2005) legen nahe, dass die Substanz in Belebungsanlagen mäßig biologisch abbaubar ist. Dieses wurde durch die Ergebnisse der 1. Projektphase bestätigt<sup>22</sup>. Ferner ist zu beachten, dass die hier ermittelten dynamischen Biodegradationskonstanten  $k_{\text{bio,dyn}}$  prinzipiell unter den  $k_{\text{bio}}$ -Werten aus Batch-Versuchen liegen (vgl. Abs. 2.1). Ferner führt möglicherweise die Konjugation des Moleküls<sup>23</sup> zu Minderbefunden in der Zulaufprobe und damit einer Unterschätzung des biologischen Abbaus (vgl. Gleichung 1b, Abs. 2.1). Daher wird Diclofenac weiterhin der Stoffgruppe III zugeordnet.

Die ermittelten  $k_d$ - und  $k_{\text{bio}}$ -Werte von **Gabapentin** liegen in allen Versuchsreihen in einem vergleichsweise engen Bereich (Abbildung 34C,  $k_d = 61$  bis  $371$  L/kg TS, Ausreißer mit  $1256$  L/kg TS und  $k_{\text{bio}} = 0,18$  bis  $7,17$  L/kg TS \* d). Die Ergebnisse entsprechen denen der ersten Projektphase. Die Zuordnung zur Stoffgruppe III kann beibehalten werden.

Gleichfalls kann **Metoprolol** weiterhin der Stoffgruppe III zugerechnet werden (Abbildung 34D). Die in den unterschiedlichen Versuchsreihen bestimmten Sorptionskoeffizienten variieren zwischen  $k_d = 47$  und  $369$  L/kg TS (Ausreißer mit  $1305$  L/kg TS). Für den biologischen Abbau wurden Werte in einem Bereich von  $0,27$  bis  $0,96$  L/(g TS \* d) ermittelt. Alle Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie die Referenzwerte<sup>24</sup> ( $k_d = 64,5$  L/kg TS und  $k_{\text{bio}} = 0,35$ - $0,40$  L/(g TS\*d)).

Das Antibiotikum **Sulfamethoxazol** weist keine Neigung zur Sorption auf (Abbildung 34E,  $k_{d,\text{max}} = 488$  L/kg TS, Ausreißer bei  $1448$  L/kg TS). Da Sulfonamide meist neutral oder negativ geladen sind, kann dieses Verhalten relativ einfach erklärt werden (Säurekonstante  $pK_s: 5,7 - 8,4$ ). Gleiches gilt für das Antibiotikum **Trimethoprim** (Abbildung 34F). Der biologische Abbau liegt (mit wenigen Ausnahmen) im mäßigen Bereich. Beide Stoffe können daher weiterhin der Stoffgruppe III zugeordnet werden.

Die beiden PAK **Naphthalin** und **Phenanthren** zeigen eine vergleichsweise hohe Streuung hinsichtlich der ermittelten  $k_d$ - und  $k_{\text{bio}}$ -Werte (Abbildung 35A und B). Beide Stoffe liegen in einem Bereich mäßiger Abbaubarkeit ( $k_{\text{bio}} = 0,1$  bis  $10$  L/(g TS \* d). Typisch für die PAK ist, dass sich die Anteile für die unterschiedlichen Eliminationsmechanismen (Sorption vs. Abbau) gegeneinander verschieben.<sup>25</sup> Höherkondensierte PAK mit vielen Benzol-Ringen sind demnach stark sorptionsaffin und die Substanz selber ist dann nicht (oder kaum) bioverfügbar. Naphthalin (zwei Benzol-Ringe) und Phenanthren (drei Benzol-Ringe) gehören zu den PAK, die einen relevanten biologischen Abbau erwarten lassen. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Benzol-Ringe lässt sich aber sehr deutlich ein Unterschied im Sorptionsverhalten erkennen: Für **Phenanthren** sind deutlich höhere  $k_d$ -Werte ermittelt worden, so dass eine **Zuordnung zur Stoffgruppe IV** sinnvoll ist. Damit wäre Phenanthren der einzige Vertreter der Stoffgruppe IV, für den regelmäßige Positive Befunde in der Analytik vorliegen. Naphthalin könnte aufgrund

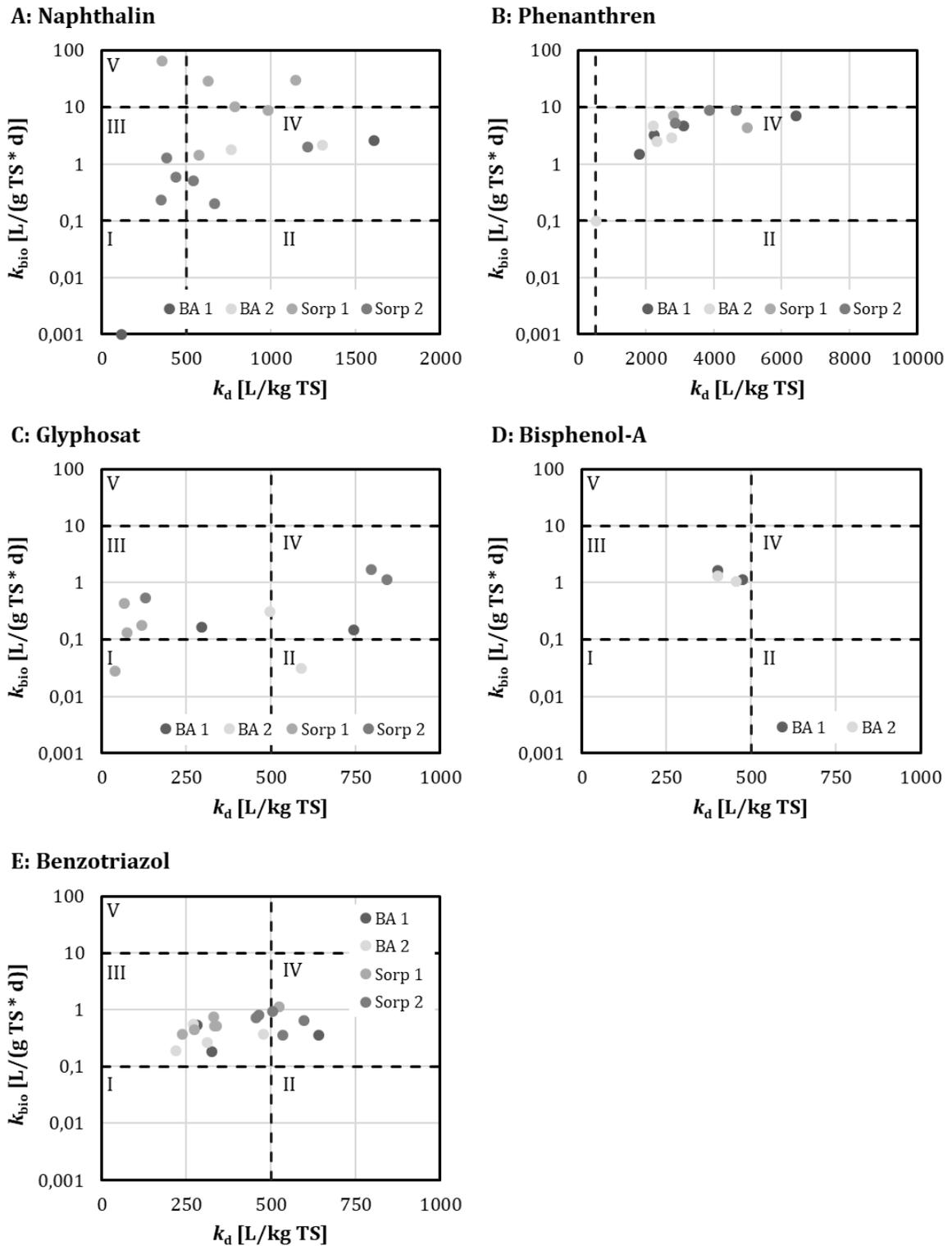
<sup>22</sup> Vgl. Abs. 5.3.4 mit Tabelle 22 des Vollberichts zur 1. Projektphase.

<sup>23</sup> Dieses Phänomen wird von Margot 2015 für Diclofenac beschrieben. Mehr zu konjugierten System s. Abs. 3.4.2 des Vollberichts zur 1. Projektphase.

<sup>24</sup> Vgl. Anhang 1 des Vollberichts zur 1. Projektphase mit weiteren Nachweisen.

<sup>25</sup> Vgl. Abs. 5.5.1 im Vollbericht zur 1. Projektphase.

seines sehr diversen Sorptionsverhaltens ( $k_d$  von 120 bis 1305 L/kg TS) beiden Stoffgruppen III und IV zugerechnet werden.



**Abbildung 35: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe III (Teil 2).**

Daten aus den Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Sorp.) und der Abbaubarkeit (BA). Für nicht dargestellte Stoffe oder fehlende Datenpunkte konnten keine Daten erhoben werden. Für die Grenzen zwischen Stoffgruppen I bis V s. Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen.

**Glyphosat** weist im Allgemeinen eine geringe Sorptionsneigung auf (Abbildung 35C). Für einzelne Proben wurden sehr hohe Sorptionskoeffizienten (bis  $k_d > 4000$  L/kg TS) ermittelt. Dieses ist mit Blick auf die Ergebnisse der 1. Projektphase<sup>26</sup> und aufgrund des bekannten Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten ( $\log k_{OW} = -3,50$ ) auszuschließen. Es wird daher auf die Möglichkeit der Bildung von Wasserstoff-Brückenbindungen verwiesen (vgl. Abs. 4.2.4). Falls diese für die Ablaufproben zu Minderbefunden führen, hat es zunächst erhöhte Sorptionskoeffizienten zur Folge (vgl. Gleichung 5, Abs. 2.2, dort als  $c_w$  bezeichnet). Im weiteren sind dann auch die Biodegradationskonstanten  $k_{bio,dyn}$  erhöht (vgl. Gleichung 1b, Abs. 2.1), da der  $k_d$ -Wert in die Berechnung dieses Wertes einbezogen wird. Vor diesem Hintergrund wird Glyphosat weiterhin als mäßig biologisch und nicht sorptionsaffin einstuft und der Stoffgruppe II zugeordnet.

Die Gegenüberstellung von  $k_d$ - und  $k_{bio}$ -Werten für **Bisphenol-A** zeigt, dass dieser Stoff mäßig abbaubar ist und kaum zur Sorption neigt (meist:  $k_d < 500$  l/kg TS; Ausreißer bis  $k_{d,max} = 3391$  L/kg TS). Einzelne Ausreißer ließen sich mit analytischen Problemen erklären (vgl. Glyphosat), die aber für Bisphenol A nicht bekannt sind. Weiter kommt die Art der Versuchsdurchführung und Probenahme als mögliche Ursache für solche Ausreißer in Betracht (s. Abs. 4.3.5). Die  $k_{bio}$ -Werte von Bisphenol A liegen gänzlich im Bereich einer mäßigen Abbaubarkeit ( $k_{bio,dyn} = 1,04$  bis  $6,37$  L/(g TS \* d)). Die Zuordnung zur Stoffgruppe III trifft daher das Richtige.

Die ermittelten  $k_d$ - und  $k_{bio}$ -Werte von **Benzotriazol** liegen in allen Versuchsreihen in einem vergleichsweise engen Bereich (Abbildung 34C,  $k_d = 219$  bis  $641$  L/kg TS, Ausreißer mit  $1342$  L/kg TS und  $k_{bio} = 0,18$  bis  $1,86$  L/kg TS \* d). Die Ergebnisse entsprechen denen der ersten Projektphase. Die Zuordnung zur Stoffgruppe III kann beibehalten werden.

#### 5.1.4 Stoffgruppe IV (mäßig abbaubare, sorptive Stoffe)

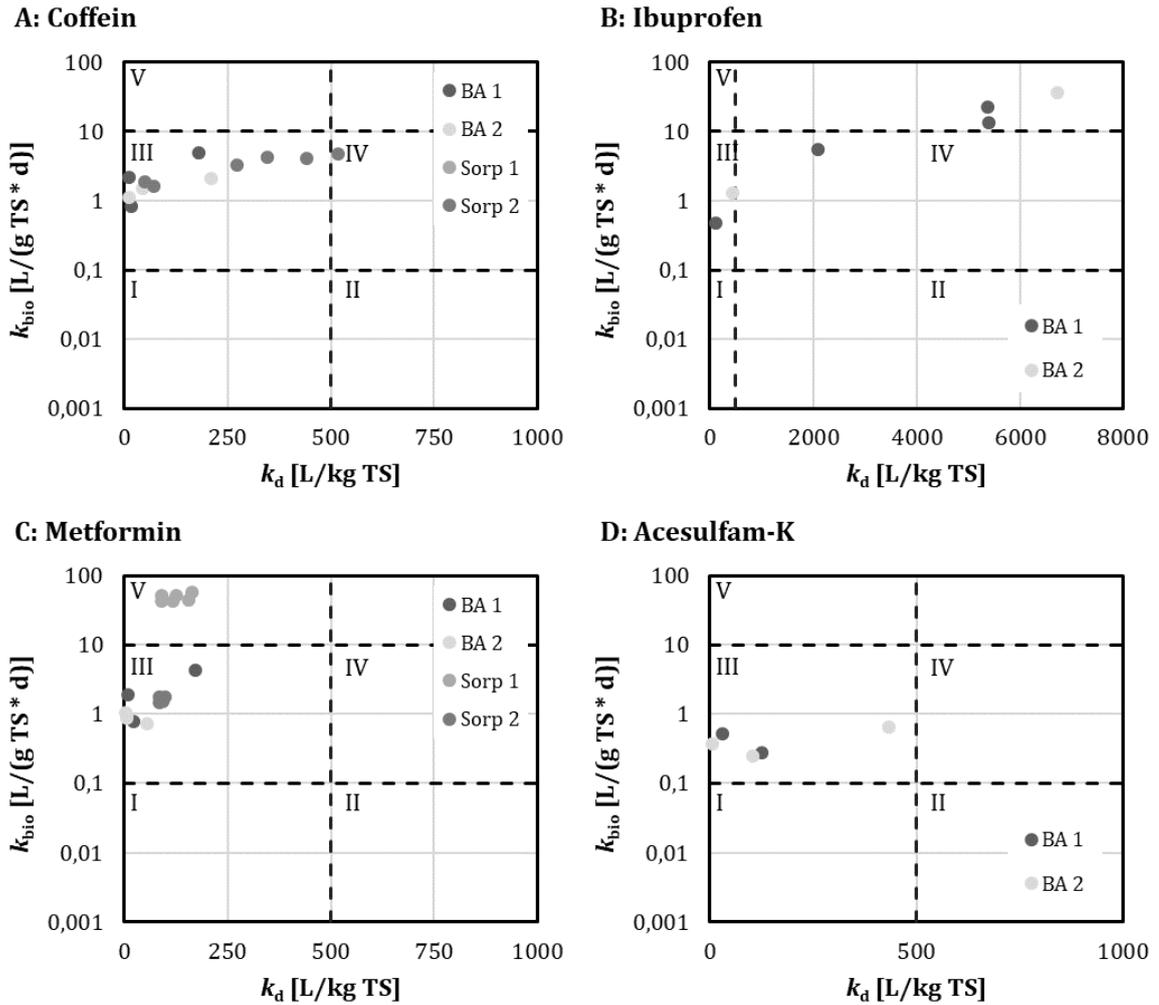
Für Vertreter dieser Stoffgruppe (Fluoren, Acenaphten, Acenaphthylen, Anthracen) konnten keine  $k_{bio}$ - und  $k_d$ -Werte nur als Mindestwerte (bezogen auf die Bestimmungsgrenze der Zulaufprobe) bestimmt werden. Ursächlich hierfür waren die aufgrund der guten Eliminationsleistung niedrigen Stoffkonzentrationen im Ablauf unterhalb der Bestimmungsgrenze sein.

#### 5.1.5 Stoffgruppe V (gut abbaubare, nicht sorptive Stoffe)

Die Substanzen der Stoffgruppe V zeichnen sich durch eine verhältnismäßig höhere Abbaubarkeit gegenüber den Vertretern der Stoffgruppe III aus. Wie Abbildung 36 zeigt, trifft die Zuordnung im Wesentlichen das Richtige, obschon die Grenze zwischen mäßigem und gutem biologischen Abbau ( $k_{bio} = 10$  L/(g TS \* d)) selten erreicht wird. Dieses ist vermutlich der systematischen Unterschätzung der  $k_{bio}$ -Werte bei dynamischer Versuchsanordnung in dieser Studie geschuldet (vgl. Abs. 2.1).

Ibuprofen weist in einigen Fällen sehr hohe Sorptionskoeffizienten auf ( $k_{d,max} > 6000$  L/kg TS, Abbildung 36B), die ansonsten nur für Schwermetalle zu erwarten wären. Diese Daten stammen aus der als problematisch eingestuften Versuchsreihe zum biologischen Abbau. Da aber im Ablauf die Konzentration im Vergleich zur Zulaufkonzentration sehr gering ist und auch im Überschussschlamm keine nennenswerten Stofffrachten zu verzeichnen sind (vgl. Anhang 3.1 und 4.1), ist weiterhin die Zuordnung zu Stoffgruppe V gerechtfertigt.

<sup>26</sup> Vgl. Abs. 5.48 mit Tabelle 38, im Vollbericht zur 1. Projektphase.



**Abbildung 36: Gegenüberstellung der ermittelten Sorptionskoeffizienten und der Biodegradationskonstanten für Spurenstoffe der Stoffgruppe V.**

Daten aus den Versuchsreihen zur Bestimmung der Sorption (Sorp.) und der Abbaubarkeit (BA). Für nicht dargestellte Stoffe oder fehlende Datenpunkte konnten keine Daten erhoben werden. Für die Grenzen zwischen Stoffgruppen I bis V s. Abs. 2.1 und 2.2 mit weiteren Nachweisen.

## 5.2 Zusammenstellung charakteristischer Kennwerte

Aus den Ergebnissen der zuvor dargestellten Arbeitspakete lassen sich charakteristische Kennwerte für den biologischen Abbau (Tabelle 22) und die Sorption (Tabelle 23) ableiten. Diese berücksichtigen im Gegensatz zu sonst üblichen Standversuchen insbesondere das dynamische Verhalten einer Belebungsanlage. Die Kennwerte können damit Grundlage einer praxisnahen Modellierung des Spurenstoff-Rückhalts in entsprechenden Anlagen sein.

**Tabelle 22: Statistische Auswertung der ermittelten Biodegradationskonstanten  $k_{bio,dyn}$  [L/g TS \* d].**

Basierend auf Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus und zur Sorption. Auswertung nach Gleichung 1b (Abs. 2.1). Einzelwerte in Anhang 3.1.2 und 4.1.2. Für fehlende Substanzen konnten keine Daten erhoben werden.

St.Gr.	Name	Anzahl	Min.	5%-Quantil	Median	95%-Quantil	Max.
I	Carbamazepin	20	0,000	0,000	<b>0,001</b>	0,297	0,751
	Imidacloprid	20	0,000	0,000	<b>0,162</b>	27,585	29,569
	Iopamidol	6	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,230	0,307
II	Nickel (Ni) <sup>1</sup>	18	0,000	0,000	<b>4,562</b>	20,141	21,613
	PFOS	6	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,840	0,859
III	Ciprofloxacin	20	0,261	0,368	<b>1,360</b>	4,541	4,975
	Diclofenac	20	0,000	0,000	<b>0,008</b>	0,157	0,270
	Gabapentin	20	0,184	0,240	<b>0,868</b>	5,910	7,174
	Metoprolol	20	0,267	0,320	<b>0,575</b>	0,996	1,722
	Sulfamethoxazol	20	0,101	0,152	<b>0,334</b>	21,453	22,406
	Trimethoprim	20	0,000	0,014	<b>0,202</b>	6,878	7,663
	Glyphosat	20	0,000	0,000	<b>0,173</b>	3,796	31,927
	Naphthalin	18	0,001	0,172	<b>2,061</b>	35,692	65,481
	Phenanthren	20	0,097	0,270	<b>3,025</b>	8,800	8,923
	Bisphenol A	6	1,044	1,062	<b>1,488</b>	5,282	6,371
Benzotriazol	20	0,000	0,174	<b>0,518</b>	1,151	1,861	
IV	Coffein	13	0,815	0,986	<b>2,065</b>	4,783	4,908
	Ibuprofen	12	0,472	0,643	<b>1,380</b>	28,535	35,667
	Metformin	19	0,728	0,774	<b>1,748</b>	51,711	56,841
	Acesulfam-K	13	0,251	0,268	<b>0,895</b>	1,460	1,839

<sup>1</sup> Daten nicht aussagekräftig aufgrund Analysefehler (s. Abs. 5.1.2 mit 2.1).

**Tabelle 23: Statistische Auswertung der ermittelten Sorptionskoeffizienten  $k_d$  [L/kg TS].**

Basierend auf Versuchsreihen zur Bestimmung des biologischen Abbaus und zur Sorption. Auswertung nach Gleichung 5 (Abs. 2.2). Einzelwerte in Anhang 3.1.3 und 4.1.3. Für fehlende Substanzen konnten keine Daten erhoben werden.

St.Gr.	Name	Anzahl	Min.	5%-Quantil	Median	95%-Quantil	Max.
I	Carbamazepin	26	152	169	<b>206</b>	598	1435
	Iopamidol	6	104	121	<b>209</b>	266	274
	Imidacloprid	26	95	133	<b>216</b>	780	1342
II	Nickel (Ni)	24	975	1544	<b>2172</b>	10911	14765
	Pyren	2	3774	4592	<b>11954</b>	19316	20134
	PFOS	4	86	89	<b>108</b>	130	134
III	Ciprofloxacin	26	313	327	<b>414</b>	1288	4737
	Diclofenac	26	158	187	<b>227</b>	670	1486
	Gabapentin	26	61	79	<b>142</b>	368	1256
	Metoprolol	26	47	91	<b>181</b>	354	1305
	Sulfamethoxazol	26	2	2	<b>43</b>	447	1448
	Trimethoprim	26	124	133	<b>207</b>	732	1387
	Glyphosat	26	23	45	<b>682</b>	2133	3964
	Naphthalin	23	120	352	<b>767</b>	1871	4698
	Phenanthren	16	511	1479	<b>2983</b>	6571	7044
	Bisphenol A	24	197	225	<b>407</b>	1057	3391
	Benzotriazol	26	215	224	<b>376</b>	630	1342
V	Coffein	16	12	12	<b>195</b>	573	738
	Ibuprofen	9	107	194	<b>704</b>	6199	6729
	Metformin	25	4	6	<b>91</b>	161	171
	Acesulfam-K	7	4	12	<b>126</b>	1115	1406

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Aus den Projektergebnissen lassen sich einige praktische Handlungsempfehlungen für die kommunale Abwasserreinigung einschließlich des Betriebes der Entwässerungssysteme ableiten. Diese Empfehlungen gelten ergänzend zu den Ausführungen im Abschlussbericht der ersten Projektphase. Zudem erfolgen Empfehlungen, welche Stoffe bei folgenden Projekten mit ähnlichen Fragestellungen berücksichtigt werden sollten (Leitparameter). Dieses schließt auch Projekte ein, die schwerpunktmäßig Verfahren der sog. 4. Reinigungsstufe untersuchen.

### 6.1 Ableitung von Leitparametern

Hinsichtlich der Erfassung von Spurenstoffen im Abwasser bzw. deren Rückhalt in den Kläranlagen ist es kaum möglich, alle verschiedenen Einzelstoffe zu analysieren. Vielmehr ist es sinnvoll, Vertreter unterschiedlicher Stoffgruppen auszuwählen, die jeweils ähnliche Stoffeigenschaften haben. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden fünf Stoffgruppen definiert, die repräsentativ für die relevanten Rückhaltemechanismen in der konventionellen mechanisch-biologischen Abwasserreinigung sind. Diese Mechanismen zeichnen sich einerseits durch einen biologischen Abbau aus, der anhand des Biodegradationskonstanten  $k_{\text{bio}}$  quantifiziert werden kann. Andererseits trägt die Sorption (am Belebt- oder auch Primärschlamm) zur Entfernung von Spurenstoffen aus der wässrigen Phase bei. Beide Mechanismen sind dominant hinsichtlich des Rückhaltes anthropogener Spurenstoffe in der Abwasserreinigung. Andere Prozesse (z. B. Photolyse oder Strippung) spielen nur für einzelne Spurenstoffe und dann meist ergänzend zum biologischen Abbau und/ oder zur Sorption eine Rolle.

Die in beiden Projektphasen berücksichtigten mehr als 50 Spurenstoffe wurden – soweit möglich – je einer der fünf Stoffgruppen zugeordnet. Diese Einteilung erfolgte im Zuge der 1. Projektphase und konnte im Wesentlichen während der Datenauswertung der 2. Projektphase bestätigt werden. Einzig das PAK Phenanthren sollte aufgrund einer nun deutlich indizierten Sorptionsneigung der Stoffgruppe IV (vorher: III) zugeordnet werden.

Zur Vereinfachung und für eine effizientere Gestaltung von Folgeprojekten, die das in dieser Studie skizzierte Stoffgruppen-Konzept weiterverfolgen, werden aus jeder Gruppe charakteristische Leitparameter ausgewählt. Hierbei wird berücksichtigt, dass die nachweisbaren Stoffkonzentrationen im Normalfall immer oberhalb der hier zur Anwendung gebrachten Bestimmungsgrenzen (in allen Medien: Rohabwasser, Belebt-/ Überschussschlamm und Klarwasser) liegt. Ferner wird berücksichtigt, dass die einzelnen Stoffe nicht auf andere Weise eliminiert werden können. So wird beispielsweise das infolge Photolyse (auch Sonnenlicht) eliminierte Diclofenac, das andererseits aufgrund seiner hohen Nachweisbarkeit und vergleichsweise guten Referenzdatenlage als Leitparameter prädestiniert wäre, nicht als solcher berücksichtigt. Abs. 2.3 und 2.4 geben eine Übersicht über diese Mechanismen und benennen Stoffe, die entsprechend beeinflusst werden könnten. Schließlich werden Stoffe ausgewählt, für die keine analytischen Probleme zu erwarten sind (vgl. Abs. 4.2.4 mit Tabelle 17). Außerdem werden Stoffe möglichst unterschiedlicher Herkunft (Arzneistoffe, PSM, PAK, Sonstige) berücksichtigt.

Tabellen 24 bis 28 stellen die empfohlenen Leitparameter für jede Stoffgruppe zusammen, die dazu dienen können, die Leistungsfähigkeit einer Belebtschlammanlage (oder allgemeiner: einer Abwasserreinigungsanlage) zu bewerten. Viele Spurenstoffe sind eingeschränkt als Leitparameter zu empfehlen. Je nach Fragestellung und Versuchsdesign können diese Stoffe dann trotzdem als Leitparameter verwendet werden. Es werden nur die Spurenstoffe aufgeführt, für die eine für die Bewertung ausreichende Datengrundlage erhoben werden konnte.

**Tabelle 24: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe I).**

**Fett:** Stoffe, die sich ohne Einschränkungen als Leitparameter eignen. *Kursiv:* Stoffe, die mit Einschränkungen als Leitparameter geeignet sind. Fehlende Stoffe werden nicht als Leitparameter empfohlen.

<b>Carbamazepin</b>	Antiepileptikum; regelmäßig nachweisbar; kein nennenswerter biologischer Abbau (aufgrund einer Amid-Gruppe) oder Aufkonzentration im Klärschlamm feststellbar. Ganzjährig gleichmäßige Verwendung. Keine nennenswerte Beeinflussung durch Fällung (erst bei hoher Überdosierung) oder Co-Substrate. Aufgrund der hohen Persistenz ggf. geeignet als anthropogener Verschmutzungsmarker beim Monitoring von Oberflächen- oder Grundwasserkörpern (s. Clara et al. 2004).
<i>Imidacloprid</i>	Neonicotinoid, seit 2018 auf Freilandkulturen in Deutschland verboten. Verwendung nur noch in Gewächshäusern und zur Behandlung von Saatgut (Beizung). Ferner findet es bei Haustieren (Katzen und Hunden) als Insektizid bei Flohbefall weiterhin Anwendung. Keine Kenntnisse über saisonal erhöhte Konzentrationen oder Stofffrachten im Rohabwasser. Konzentrationen lagen häufig nur wenig oberhalb der Bestimmungsgrenze (hier: 0,02 µg/L). Die JD-UQN (nach OGewV, Anhang 6) beträgt 0,002 µg/L). Bei Folgeprojekten sollte daher eine deutlich niedrigere BG angestrebt werden.

**Tabelle 25: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe II).**

**Fett:** Stoffe, die sich ohne Einschränkungen als Leitparameter eignen. *Kursiv:* Stoffe, die mit Einschränkungen als Leitparameter geeignet sind. Fehlende Stoffe werden nicht als Leitparameter empfohlen.

<i>Pyren, Flouranthen</i>	PAKs, regelmäßig nachweisbar in Rohabwasser sowie Belebt- und Klärschlamm; gelegentlich nachweisbar im Ablauf. Ablaufkonzentrationen wohl meist gerade unterhalb der BG (hier: 0,01 µg/L). Bei einer Reduzierung der BG, sinnvolle Leitparameter
<i>Triclosan</i>	Desinfektionsmittel; ist bei niedriger BG (0,02 µg/L, vgl. 1. Projektphase – entspricht der UQN gem. OGewV, Anhang 6) ein geeigneter Leitparameter. Wird bei höherer BG (hier: 0,05 µg/L) nur gelegentlich quantifiziert und ist dann nicht als Leitparameter zu empfehlen.

**Tabelle 26: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe III).**

**Fett:** Stoffe, die sich ohne Einschränkungen als Leitparameter eignen. *Kursiv:* Stoffe, die mit Einschränkungen als Leitparameter geeignet sind. Fehlende Stoffe werden nicht als Leitparameter empfohlen.

<i>Ciprofloxacin</i>	Antibiotikum (Fluorchinolon) Elimination infolge Fällmittelgabe bereits bei geringen/ üblichen Dosierungen (Eliminationsraten bis ca. 80 %) Ausgeprägt saisonale Verwendung, daher nur bedingt als Leitparameter zu empfehlen
<i>Diclofenac</i>	nichtsteroidales Antirheumatikum Ggf. Elimination infolge Photolyse; Elimination infolge Fällmittelgabe (insbesondere FeCl <sub>3</sub> bis zu 24 %) Ausgeprägt saisonale Verwendung und saisonal unterschiedlicher (temperaturabhängiger) biologischer Abbau, daher nur bedingt als Leitparameter zu verwenden
<b>Gabapentin</b>	Antiepileptikum Kein nennenswerter Einfluss von Fällmitteln; kein signifikanter Einfluss von Co-Substraten Quasi-kontinuierliche, ganzjährige Anwendung
<b>Metoprolol</b>	Betablocker Kein nennenswerter Einfluss von Fällmitteln; ggf. Unterschätzung der Stoffkonzentration bei Gabe von Methanol Quasi-kontinuierliche, ganzjährige Anwendung
<i>Sulfamethoxazol</i>	Antibiotikum (Sulfonamide) ggf. Elimination infolge Photolyse oder Hydrolyse; Elimination infolge Fällmittelgabe (erst bei hoher Überdosierung); ggf. Unterschätzung der Stoffkonzentration bei Gabe von Methanol oder Essigsäure Ausgeprägt saisonale Verwendung
<i>Trimethoprim</i>	Antibiotikum (Sulfonamide) Kein nennenswerter Einfluss von Fällmitteln; kein signifikanter Einfluss von Co-Substraten; Stoffkonzentrationen immer deutlich oberhalb der BG (in allen Medien) Ausgeprägt saisonale Verwendung
<i>Glyphosat</i>	Breitbandherbizid Ggf. analytische Probleme aufgrund von Wasserstoff-Brückenbindungen; Überschätzung der Stoffkonzentration bei der Verwendung von Essigsäure Elimination infolge Fällmittelgabe (bis über 80 %) bereits bei geringen/ üblichen Dosierungen Deutlich ausgeprägte saisonale Anwendung
<b>Benzotriazol</b>	Korrosionsschutzmittel und Frostschutzmittel Keine analytischen Probleme bekannt; Stoffkonzentrationen immer deutlich oberhalb der BG (in allen Medien) Saisonal vermehrte Anwendung als Enteisungsmittel möglich.
<i>Naphthalin</i>	PAK Sorption und biologischer Abbau hängen wesentlich von weiteren (nicht bekannten) Faktoren ab (vgl. Abs. 5.1.3); das Verhalten in Belebtschlammverfahren kann daher nicht ausreichend genau prognostiziert werden. Stoffkonzentrationen liegen meist wenig oberhalb der BG (hier: 0,01 µg/L); damit der einzige Vertreter der PAK, der regelmäßig auch im Klarwasser nachweisbar ist; je nach Fragestellung kann der Stoff daher bei einer weiteren Reduzierung der BG ein sinnvoller Leitparameter sein

**Tabelle 27: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe IV).**

**Fett:** Stoffe, die sich ohne Einschränkungen als Leitparameter eignen. *Kursiv:* Stoffe, die mit Einschränkungen als Leitparameter geeignet sind. Fehlende Stoffe werden nicht als Leitparameter empfohlen.

<i>Phenanthren</i>	PAK kein Einfluss auf Analyseergebnisse durch Co-Substrat-Gabe; keine Beeinflussung durch Fällmittel Neben Naphthalin der einzige PAK-Vertreter, der bei der angewendeten BG (hier: 0,01 µg/L) regelmäßig im Ablauf nachweisbar war Ergebnisauswertung (vgl. Abs. 5.1.3) zeigt eine Zuordnung zur Stoffgruppe IV (bisher: III) an; damit wäre Phenanthren der einzige Vertreter dieser Stoffgruppe, der bei Anwendung der o. g. BG in der Regel nachweisbar ist.
--------------------	---

**Tabelle 28: Zusammenstellung von Leitparametern zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Abwasserreinigungsanlage (Stoffgruppe V).**

**Fett:** Stoffe, die sich ohne Einschränkungen als Leitparameter eignen. *Kursiv:* Stoffe, die mit Einschränkungen als Leitparameter geeignet sind. Fehlende Stoffe werden nicht als Leitparameter empfohlen.

<b>Metformin</b>	Antidiabetikum sehr geringe Neigung zur Sorption; daher kann durch Berücksichtigung dieses Stoffes selektiv die biologische Aktivität im Reaktor sehr gut abgebildet werden Kein nennenswert verbesserter Rückhalt infolge Fällung (im Vergleich zum biologischen Abbau) Gabe von Co-Substraten verursacht keine analytischen Probleme, führt aber aufgrund von konkurrierenden leicht abbaubaren Substraten zu reduzierten Eliminationsraten Keine saisonale Varianz im Verbrauch; daher geeigneter Leitparameter
------------------	--

## 6.2 Betriebliche und praktische Empfehlungen

Es wird deutlich, dass die konventionelle mechanisch-biologische Abwasserreinigung (i.d.R. Belebtschlammverfahren) keinen vollständigen Rückhalt anthropogener Spurenstoffe erlaubt. **Es gelten die Empfehlungen der 1. Projektphase unverändert.** Ergänzend kann festgestellt werden, dass die Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes und des Schlammalters oder eine Reduzierung der Schlammbelastung zu einem geringfügig verbesserten Rückhalt insbesondere der mäßig biologisch abbaubaren Stoffe beitragen kann. Hierzu zählen u. a. viele Arzneistoffe. Die im Rahmen betriebspraktisch umsetzbarer Grenzen erreichbaren Eliminationsraten sind allerdings marginal besser (Größenordnung je nach Spurenstoff: maximal 5 bis 10 Prozentpunkte). Es ist daher nicht zielführend, den Betrieb vorhandener Belebungsanlagen auf einen verbesserten Spurenstoff-Rückhalt auszurichten. Primäres Ziel sollte weiterhin die Betriebssicherheit und die Einhaltung der Grenzwerte nach Abwasserverordnung (oder darüber hinaus gehende Anforderungen) sein.

Auf ausschließlich sorptionsaffine, nicht abbaubare Stoffe ist ein verbesserter Rückhalt nicht nachweisbar. Eine reduzierte Schlammbelastung kann u.a. auch durch eine Reduzierung der Einträge (z.B. reduzierter Arzneimittelverbrauch) erreicht werden. Zielführend für möglichst hohe Eliminationsraten ist die konstante hydraulische und stoffliche Beschickung der biologischen Stufe. Dieses kann durch Misch- und Ausgleichsbehälter am Kläranlagenzulauf erreicht werden. Trennsysteme sind gegenüber Mischsystemen aufgrund der geringeren hydraulischen Spitzenlasten zu bevorzugen.

Der Einsatz der chemischen Fällung ist nicht zielführend hinsichtlich eines möglichst weitgehenden Rückhaltes von Spurenstoffen. Es kann im Rahmen einer Simultan-, Nach- oder Zweipunkt-Fällung jedoch im Einzelfall ein deutlich verbesserter Rückhalt bestimmter Spurenstoffe erreicht werden (Ciprofloxacin, Diclofenac), was z. T. hohe Überdosierungen erfordert.

Dieses führt zu einer Erhöhung des Schlammanfalls und insgesamt zu steigenden Betriebskosten. Eine Nachfällung wäre hierbei aufgrund der geringen Fällmittelmengen und des geringeren Schlammanfalls einer Simultanfällung vorzuziehen. Die Wahl des Fällmittels hat indes keinen relevanten Einfluss auf die Eliminationsrate oder das Rückhaltevermögen im Allgemeinen. Vielmehr sind es spezifische Wechselwirkungen zwischen Fällmittel und Spurenstoff, die im Einzelfall eine Fällungsreaktion mit anschließender Flockung hervorrufen.

Die chemische Fällung kann jedoch im Einzelfall dazu dienen, bestimmte Spurenstoffe bei einer drohenden UQN-Überschreitung im Gewässer zurückzuhalten. Es werden dadurch selektiv nur wenige Spurenstoffe beeinflusst. Konkret trifft dieses z. B. auf Diclofenac zu, das seit 2015 auf der Beobachtungsliste der EU steht und ggf. in die Liste prioritärer Stoffe aufgenommen wird (UQN-Vorschlag bisher: 0,05 µg/L). Die selektive Reduzierung einzelner Spurenstoffe widerspricht dem Ansatz einer ganzheitlichen Reduzierung der Spurenstoff-Frachten im Kläranlagen-Ablauf. Die für einen signifikant verbesserten Rückhalt erforderliche Überdosierung führt schließlich zu erhöhten Betriebskosten und Schlammengen. Nicht nur aus betriebswirtschaftlicher Sicht, sondern auch aus gewässerökologischer Sicht wird diese Praxis daher nicht empfohlen.

Ein Schwachpunkt der Belebungsverfahren ist die Nachklärung (oder allgemeiner: die fest-flüssig-Trennung am Ende des Reinigungsprozesses), da in dieser meist ein nicht vollständiger Rückhalt suspendierter Stoffe erfolgt. Neben dem Eintrag dieser Stoffe in die Vorflutgewässer, gelangen auf diese Weise auch adsorbierte Stoffe in die Vorflut, die ansonsten bei einer weitgehend vollständigen fest-flüssig Trennung im Klärschlamm gebunden würden. Vor diesem Hintergrund wäre der Ersatz der Nachklärung durch eine Membran zielführend. Die Umrüstung einer Belebtschlamm-Anlage zum Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR) wäre ohne aufwändige bauliche Maßnahmen auf vielen Kläranlagen möglich. Zugleich würden diese Verfahren den bestmöglichen Rückhalt auch von Mikroplastiken (nicht Gegenstand dieser Studie) und (multiresistenten) Keimen ermöglichen. Es ist absehbar, dass beide Verschmutzungstypen in den kommenden Jahren enorme Herausforderungen an die Siedlungswasserwirtschaft stellen werden.

Daher wird dringend empfohlen, mittelfristig auch auf die landwirtschaftliche oder gartenbauliche Ausbringung von Klärschlamm zu verzichten. Klärschlamm stellt die Senke für alle sorptionsaffinen Spurenstoffe dar. Des Weiteren ist er als Senke für Mikroplastiken und multiresistenten Keimen anzusehen. Die mit der Novellierung der Klärschlammverordnung für größere Kläranlagen vorgeschriebene Monoverbrennung mit folgender Phosphor-Rückgewinnung (unter Verwendung verdünnter Phosphorsäure) ist daher zielführend und richtig. Aufgrund des enormen technischen Aufwandes sind alternative Prozesse und Techniken für eine ressourcenschonende und effiziente Phosphor-Rückgewinnung – gerade bei kleineren Kläranlagen – von besonderem Interesse.

## 7 Literaturverzeichnis

- Assalin, Marcia R.; Moraes, Sandra G. de; Queiroz, Sonia C. N.; Ferracini, Vera L.; Duran, Nelson (2010): Studies on degradation of glyphosate by several oxidative chemical processes: ozonation, photolysis and heterogeneous photocatalysis. In: *Journal of environmental science and health. Part. B, Pesticides, food contaminants, and agricultural wastes* 45 (1), S. 89–94. DOI: 10.1080/03601230903404598.
- Barret, Maialen; Carrère, Hélène; Latrille, Eric; Wisniewski, Christelle; Patureau, Dominique (2010a): Micropollutant and sludge characterization for modeling sorption equilibria. In: *Environmental science & technology* 44 (3), S. 1100–1106. DOI: 10.1021/es902575d.
- Barret, Maialen; Patureau, Dominique; Latrille, Eric; Carrère, Hélène (2010b): A three-compartment model for micropollutants sorption in sludge. Methodological approach and insights. In: *Water research* 44 (2), S. 616–624. DOI: 10.1016/j.watres.2009.08.029.
- Beier, Silvio (2010): Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010. Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen, Aachen.
- Berthod, L.; Roberts, G.; Sharpe, A.; Whitley, D. C.; Greenwood, R.; Mills, G. A. (2016): Effect of sewage sludge type on the partitioning behaviour of pharmaceuticals. A meta-analysis. In: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 2 (1), S. 154–163. DOI: 10.1039/C5EW00171D.
- Berthod, L.; Whitley, D. C.; Roberts, G.; Sharpe, A.; Greenwood, R.; Mills, G. A. (2017): Quantitative structure-property relationships for predicting sorption of pharmaceuticals to sewage sludge during waste water treatment processes. In: *The Science of the total environment* 579, S. 1512–1520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.156.
- Berthod, Laurence; Roberts, Gary; Whitley, David C.; Sharpe, Alan; Mills, Graham A. (2014): A solid-phase extraction method for rapidly determining the adsorption coefficient of pharmaceuticals in sewage sludge. In: *Water research* 67, S. 292–298. DOI: 10.1016/j.watres.2014.09.020.
- Buzier, Rémy; Tusseau-Vuillemin, Marie-Hélène; dit Meriadec, Célia Martin; Rousselot, Olivier; Mouchel, Jean-Marie (2006): Trace metal speciation and fluxes within a major French wastewater treatment plant: impact of the successive treatments stages. In: *Chemosphere* 65 (11), S. 2419–2426. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.04.059.
- Byrns, Geoff (2001): The fate of xenobiotic organic compounds in wastewater treatment plants. In: *Water research* 35 (10), S. 2523–2533. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00529-7.
- Carballa, Marta; Omil, Francisco; Lema, Juan M. (2005): Removal of cosmetic ingredients and pharmaceuticals in sewage primary treatment. In: *Water research* 39 (19), S. 4790–4796. DOI: 10.1016/j.watres.2005.09.018.
- Castiglioni, Sara; Bagnati, Renzo; Fanelli, Roberto; Pomati, Francesco; Calamari, Davide; Zuccato, Ettore (2006): Removal of Pharmaceuticals in Sewage Treatment Plants in Italy. In: *Environ. Sci. Technol.* 40 (1), S. 357–363. DOI: 10.1021/es050991m.
- Clara, M.; Kreuzinger, N.; Strenn, B.; Gans, O.; Kroiss, H. (2005): The solids retention time-a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. In: *Water research* 39 (1), S. 97–106. DOI: 10.1016/j.watres.2004.08.036.
- Göbel, Anke; McArdell, Christa S.; Joss, Adriano; Siegrist, Hansruedi; Giger, Walter (2007): Fate of sulfonamides, macrolides, and trimethoprim in different wastewater treatment technologies. In: *The Science of the total environment* 372 (2-3), S. 361–371. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.07.039.

- Hyland, Katherine C.; Dickenson, Eric R. V.; Drewes, Jörg E.; Higgins, Christopher P. (2012): Sorption of ionized and neutral emerging trace organic compounds onto activated sludge from different wastewater treatment configurations. In: *Water research* 46 (6), S. 1958–1968. DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.012.
- Jarvis, P.; Jefferson, B.; Parsons, S. A. (2004): Characterising natural organic matter flocs. In: *Water Supply* 4 (4), S. 79–87. DOI: 10.2166/ws.2004.0064.
- Jones, O. A. H.; Voulvoulis, N.; Lester, J. N. (2007): The occurrence and removal of selected pharmaceutical compounds in a sewage treatment works utilising activated sludge treatment. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 145 (3), S. 738–744. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.08.077.
- Joss, Adriano; Zabczynski, Sebastian; Göbel, Anke; Hoffmann, Burkhard; Löffler, Dirk; Mc Ardell, Christa S. et al. (2006): Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment. Proposing a classification scheme. In: *Water research* 40 (8), S. 1686–1696. DOI: 10.1016/j.watres.2006.02.014.
- Kasprzyk-Hordern, Barbara; Dinsdale, Richard M.; Guwy, Alan J. (2009): The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. In: *Water research* 43 (2), S. 363–380. DOI: 10.1016/j.watres.2008.10.047.
- Kraut, K. H.; Bondareva, O. (2000): Anwendung von Flockungsverfahren beider Regenwasserbehandlung. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen P!97.189. Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau. Stuttgart.
- Kreuzinger, N.; Clara, M.; Strenn, B.; Kroiss, H. (2004): Relevance of the sludge retention time (SRT) as design criteria for wastewater treatment plants for the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals from wastewater. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 50 (5), S. 149–156.
- Kruglova, Antonina; Ahlgren, Pia; Korhonen, Nasti; Rantanen, Pirjo; Mikola, Anna; Vahala, Riku (2014): Biodegradation of ibuprofen, diclofenac and carbamazepine in nitrifying activated sludge under 12 °C temperature conditions. In: *The Science of the total environment* 499, S. 394–401.
- Lee, Kuan-Chun; Rittmann, Bruce E.; Shi, Jichun; McAvoy, Drew (1998): Advanced Steady-State Model for the Fate of Hydrophobic and Volatile Compounds in Activated Sludge. In: *Water Environment Research* 70 (6), S. 1118–1131.
- Lefebvre, O.; Lai, Y. L.; How, Y. N. (2010): Chapter 6: Physico-chemical treatment of Micropollutants: coagulation and membrane processes. In: Jurate Virkutyte, Rajender S. Varma und Veeriah Jegatheesan (Hg.): *Treatment of micropollutants in water and wastewater*. London: IWA Publishing (Integrated environmental technology series), S. 205–237.
- Mailler, R.; Gasperi, J.; Rocher, V.; Gilbert-Pawlik, S.; Geara-Matta, D.; Moilleron, R.; Chebbo, G. (2014): Biofiltration vs conventional activated sludge plants. What about priority and emerging pollutants removal? In: *Environmental science and pollution research international* 21 (8), S. 5379–5390. DOI: 10.1007/s11356-013-2388-0.
- Margot, Jonas (2015): Micropollutant removal from municipal wastewater. From conventional treatments to advanced biological processes. PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, These No 6505.
- Margot, Jonas; Rossi, Luca; Barry, David A.; Holliger, Christof (2015): A review of the fate of micropollutants in wastewater treatment plants. In: *WIREs Water* 2 (5), S. 457–487. DOI: 10.1002/wat2.1090.

- Matilainen, Anu; Vepsäläinen, Mikko; Sillanpää, Mika (2010): Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. In: *Advances in colloid and interface science* 159 (2), S. 189–197. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
- Miano, T. M.; Piccolo, A.; Celano, G.; Senesi, N. (1992): Infrared and fluorescence spectroscopy of glyphosate-humic acid complexes. In: *Science of The Total Environment* 123-124, S. 83–92. DOI: 10.1016/0048-9697(92)90135-F.
- Nam, Seung-Woo; Jo, Byung-Il; Yoon, Yeomin; Zoh, Kyung-Duk (2014): Occurrence and removal of selected micropollutants in a water treatment plant. In: *Chemosphere* 95, S. 156–165. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.08.055.
- Palmisano, Raffaella; Campanella, Luigi (2015): Photo-Degradation of Amoxicillin, Streptomycin, Erythromycin and Ciprofloxacin by UV and UV/TiO<sub>2</sub> Processes. Evaluation of Toxicity Changes Using a Respirometric Biosensor. In: *J Environ Anal Chem* 02 (03). DOI: 10.4172/2380-2391.1000143.
- Papageorgiou, Myrsini; Kosma, Christina; Lambropoulou, Dimitra (2016): Seasonal occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of 55 pharmaceuticals and personal care products in a municipal wastewater treatment plant in Central Greece. In: *The Science of the total environment* 543 (Pt A), S. 547–569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.047.
- Piccolo, A.; Celano, G. (1994): Hydrogen-bonding interactions between the herbicide glyphosate and water-soluble humic substances. In: *Environ Toxicol Chem* 13 (11), S. 1737–1741. DOI: 10.1002/etc.5620131104.
- Plósz, Benedek G. Y.; Leknes, Henriette; Thomas, Kevin V. (2010): Impacts of competitive inhibition, parent compound formation and partitioning behavior on the removal of antibiotics in municipal wastewater treatment. In: *Environmental science & technology* 44 (2), S. 734–742. DOI: 10.1021/es902264w.
- Poirier-Larabie, S.; Segura, P. A.; Gagnon, C. (2016): Degradation of the pharmaceuticals diclofenac and sulfamethoxazole and their transformation products under controlled environmental conditions. In: *The Science of the total environment* 557-558, S. 257–267. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.057.
- Pomiès, M.; Choubert, J-M; Wisniewski, C.; Coquery, M. (2013): Modelling of micropollutant removal in biological wastewater treatments. A review. In: *The Science of the total environment* 443, S. 733–748. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.11.037.
- Ryan, Christopher C.; Tan, David T.; Arnold, William A. (2011): Direct and indirect photolysis of sulfamethoxazole and trimethoprim in wastewater treatment plant effluent. In: *Water research* 45 (3), S. 1280–1286. DOI: 10.1016/j.watres.2010.10.005.
- Schwarzenbach, René P.; Gschwend, Philip M.; Imboden, Dieter M. (2017): Environmental organic chemistry. Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=11282612>.
- Sharp, E. L.; Jarvis, P.; Parsons, S. A.; Jefferson, B. (2006): Impact of fractional character on the coagulation of NOM. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 286 (1-3), S. 104–111. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.03.009.
- Sipma, Jan; Osuna, Begoña; Collado, Neus; Monclús, Hector; Ferrero, Giuliana; Comas, Joaquim; Rodriguez-Roda, Ignasi (2010): Comparison of removal of pharmaceuticals in MBR and activated sludge systems. In: *Desalination* 250 (2), S. 653–659. DOI: 10.1016/j.desal.2009.06.073.
- Stasinakis, Athanasios S.; Kordoutis, Constantinos I.; Tsiouma, Vasiliki C.; Gatidou, Georgia; Thomaidis, Nikolaos S. (2010): Removal of selected endocrine disrupters in activated

- sludge systems. Effect of sludge retention time on their sorption and biodegradation. In: *Bioresource technology* 101 (7), S. 2090–2095. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.10.086.
- Stevens-Garmon, John; Drewes, Jörg E.; Khan, Stuart J.; McDonald, James A.; Dickenson, Eric R. V. (2011): Sorption of emerging trace organic compounds onto wastewater sludge solids. In: *Water research* 45 (11), S. 3417–3426. DOI: 10.1016/j.watres.2011.03.056.
- Suarez, Sonia; Lema, Juan M.; Omil, Francisco (2010): Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) under nitrifying and denitrifying conditions. In: *Water research* 44 (10), S. 3214–3224. DOI: 10.1016/j.watres.2010.02.040.
- Tauxe-Wuersch, A.; Alencastro, L. F. de; Grandjean, D.; Tarradellas, J. (2005): Occurrence of several acidic drugs in sewage treatment plants in Switzerland and risk assessment. In: *Water research* 39 (9), S. 1761–1772. DOI: 10.1016/j.watres.2005.03.003.
- Ternes, Thomas A. (1998): Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. In: *Water research* 32 (11), S. 3245–3260. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00099-2.
- Ternes, Thomas A.; Herrmann, Nadine; Bonerz, Matthias; Knacker, Thomas; Siegrist, Hansruedi; Joss, Adriano (2004): A rapid method to measure the solid-water distribution coefficient (K<sub>d</sub>) for pharmaceuticals and musk fragrances in sewage sludge. In: *Water research* 38 (19), S. 4075–4084. DOI: 10.1016/j.watres.2004.07.015.
- Ternes, Thomas A.; Stüber, Jeannette; Herrmann, Nadine; McDowell, Derek; Ried, Achim; Kampmann, Martin; Teiser, Bernhard (2003): Ozonation. A tool for removal of pharmaceuticals, contrast media and musk fragrances from wastewater? In: *Water research* 37 (8), S. 1976–1982. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00570-5.
- Thomas, D. N.; Judd, S. J.; Fawcett, N. (1999): Flocculation modelling: a review. In: *Water research* 33 (7), S. 1579–1592. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00392-3.
- Urase, Taro; Kikuta, Tomoya (2005): Separate estimation of adsorption and degradation of pharmaceutical substances and estrogens in the activated sludge process. In: *Water research* 39 (7), S. 1289–1300. DOI: 10.1016/j.watres.2005.01.015.
- Verlicchi, Paola; Zambello, Elena (2014): How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. In: *The Science of the total environment* 470–471, S. 1281–1306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.085.
- Vieno, Niina M.; Tuhkanen, Tuula; Kronberg, Leif (2005): Seasonal variation in the occurrence of pharmaceuticals in effluents from a sewage treatment plant and in the recipient water. In: *Environmental science & technology* 39 (21), S. 8220–8226.
- Völker, Johannes (2017): Effect-based assessment of biological wastewater treatment processes targeting organic micropollutant removal. Dissertation. Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hebis:30:3-452777>.
- Wang, Jianmin; Huang, C. P.; Allen, Herbert E. (2003): Modeling heavy metal uptake by sludge particulates in the presence of dissolved organic matter. In: *Water research* 37 (20), S. 4835–4842. DOI: 10.1016/j.watres.2003.08.021.
- Wang, Xiao-Huan; Lin, Angela Yu-Chen (2014): Is the phototransformation of pharmaceuticals a natural purification process that decreases ecological and human health risks? In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 186, S. 203–215. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.007.
- Wick, Arne; Fink, Guido; Joss, Adriano; Siegrist, Hansruedi; Ternes, Thomas A. (2009): Fate of beta blockers and psycho-active drugs in conventional wastewater treatment. In: *Water research* 43 (4), S. 1060–1074. DOI: 10.1016/j.watres.2008.11.031.

- Wick, Arne; Marincas, Olivian; Moldovan, Zaharie; Ternes, Thomas A. (2011): Sorption of biocides, triazine and phenylurea herbicides, and UV-filters onto secondary sludge. In: *Water research* 45 (12), S. 3638–3652. DOI: 10.1016/j.watres.2011.04.014.
- Ying, Guang-Guo; Zhao, Jian-Liang; Zhou, Li-Jun; Liu, Shan (2013): Fate and Occurrence of Pharmaceuticals in the Aquatic Environment (Surface Water and Sediment). In: Mira Petrovic, Damià Barceló und Sandra Pérez (Hg.): Analysis, removal, effects and risk of pharmaceuticals in the water cycle. Occurrence and transformation in the environment, Bd. 62. Second edition. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London: Elsevier (Comprehensive Analytical Chemistry, Volume 62), S. 453–557.
- Zwiener, Christian; Glauner, Thomas; Frimmel, Fritz H. (2000): Biodegradation of Pharmaceutical Residues Investigated by SPE-GC/ITD-MS and On-Line Derivatization. In: *J. High Resol. Chromatogr.* 23 (7-8), S. 474–478. DOI: 10.1002/1521-4168(20000801)23:7/8<474::AID-JHRC474>3.0.CO;2-B.

## 8 Anhang

Anhang 1	Ergebnisse der Fällversuche	89
Anhang 2	Ergebnisse der Co-Substrat-Gabe	141
Anhang 3	Sorptionskoeffizienten $k_d$	169
Anhang 4	Biodegradationskonstanten $k_{bio}$	221
Anhang 5	Vergleich der Ergebnisse beider Projektphasen	251

## Anhang 1 – Ergebnisse der Fällversuche

1	Analyseergebnisse .....	90
2	Grafische Darstellung .....	101
2.1	Nähr- und Zehrstoffe.....	101
2.2	Begleitparameter .....	108
2.3	Hauptionen.....	111
2.4	Spurenstoffe.....	119
2.4.1	Schwermetalle.....	119
2.4.2	Arzneistoffe .....	120
2.4.3	Pflanzenschutzmittel.....	129
2.4.4	PAKs .....	133
2.4.5	Sonstige.....	136
3	Ionenverteilung bei Fällversuchen .....	138

# 1 Analyseergebnisse

		BEGLEITPARAMETER								
		pH	LF	Redox	O <sub>2</sub>	T	TS	SV	ISV	
Typ	ID-ges	[-]	[ $\mu$ S/cm]	[mV]	[mg/l]	°C	g/l	mL/L	mL/g	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	7,29	1070	213,0	1,02	17,3	2,81	840	298,6
		FM-1-2-191024	7,03	1092	173,3	0,88	17,3	3,28	850	259,2
		FM-1-3-191024	6,83	1121	117,7	0,86	17,4	3,05	800	262,3
		FM-1-4-191024	6,72	1152	104,3	1,31	17,6	3,04	870	286,7
		FM-1-5-191024	6,63	1183	106,9	2,08	17,8	3,45	870	252,4
	AB	FM-1-6-191024	7,37	1081	198,4	5,44	18,4	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-1-7-191024	7,04	1099	188,4	5,74	18,2	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-1-8-191024	6,86	1118	147,3	6,12	18,0	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-1-9-191024	6,66	1139	126,0	6,05	17,7	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-1-10-191024	6,52	1161	127,4	6,32	17,8	n.d.	n.d.	n.d.
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	7,40	1092	283,0	3,09	15,6	3,03	910	300,8
		FM-2-2-191029	7,12	1108	252,0	2,94	15,9	3,28	910	277,4
		FM-2-3-191029	7,00	1118	214,0	3,01	15,9	3,17	890	281,0
		FM-2-4-191029	6,88	1144	144,5	2,79	15,9	3,22	920	285,4
		FM-2-5-191029	6,78	1167	143,2	3,10	16,6	2,71	915	338,1
	AB	FM-2-6-191029	7,42	1097	226,0	4,71	15,9	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-2-7-191029	6,99	1111	208,0	4,58	15,8	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-2-8-191029	6,89	1120	166,9	5,00	15,9	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-2-9-191029	6,69	1132	133,2	4,82	16,1	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-2-10-191029	6,57	1144	130,3	5,14	16,1	n.d.	n.d.	n.d.
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	7,37	949	323,0	2,99	15,1	3,49	910	261,1
		FM-3-2-191105	7,14	978	176,7	3,27	15,2	3,47	900	259,3
		FM-3-3-191105	6,99	1000	149,4	2,63	15,3	2,89	900	312,0
		FM-3-4-191105	6,86	1031	132,2	2,71	15,5	3,44	870	253,1
		FM-3-5-191105	6,76	1063	128,9	2,74	15,6	3,40	870	256,2
	AB	FM-3-6-191105	7,42	992	281,0	4,17	15,8	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-3-7-191105	7,14	1009	92,0	3,97	15,8	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-3-8-191105	7,01	1031	61,3	4,41	15,9	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-3-9-191105	6,86	1055	71,3	4,59	16,1	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-3-10-191105	6,71	1080	83,8	4,23	16,2	n.d.	n.d.	n.d.
PACl	BS	FM-4-1-191105	7,39	1073	332,0	2,48	13,7	2,81	900	320,6
		FM-4-2-191105	7,28	1088	314,0	2,93	13,7	2,88	870	301,8
		FM-4-3-191105	7,13	1101	302,0	2,43	13,8	2,89	850	294,6
		FM-4-4-191105	7,02	1119	283,0	2,54	14,0	2,68	860	320,9
		FM-4-5-191105	6,97	1129	270,0	2,83	14,1	2,51	830	331,1
	AB	FM-4-6-191105	7,43	1083	298,0	4,38	14,0	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-4-7-191105	7,28	1090	276,0	5,08	14,1	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-4-8-191105	7,00	1093	220,0	4,44	14,4	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-4-9-191105	7,18	1116	249,0	5,10	14,8	n.d.	n.d.	n.d.
		FM-4-10-191105	6,90	1132	249,0	4,69	15,3	n.d.	n.d.	n.d.

		BEGLEITPARAMETER							
		CSB	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P	Ortho-P	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	41,3	21,9	1,42	0,42	17,90	5,36	5,14
		FM-1-2-191024	43,4	23,4	1,41	0,43	17,60	2,46	2,09
		FM-1-3-191024	30,7	22,0	1,35	0,40	17,90	1,12	0,69
		FM-1-4-191024	37,4	23,6	1,43	0,42	17,90	0,93	0,26
		FM-1-5-191024	32,9	22,1	1,49	0,40	17,70	0,32	0,11
	AB	FM-1-6-191024	42,7	25,1	3,29	0,23	18,70	5,67	5,03
		FM-1-7-191024	30,5	24,3	3,32	0,23	18,40	3,00	2,33
		FM-1-8-191024	29,6	24,0	3,34	0,23	18,50	1,54	0,82
		FM-1-9-191024	24,9	24,1	3,35	0,23	18,70	0,42	0,11
		FM-1-10-191024	22,5	23,4	3,36	0,23	18,30	0,34	0,03
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	50,7	23,2	3,07	0,34	11,30	5,59	5,13
		FM-2-2-191029	47,3	20,6	3,31	0,27	11,10	2,42	1,85
		FM-2-3-191029	50,3	21,4	3,39	0,23	11,40	1,25	0,77
		FM-2-4-191029	45,7	21,1	3,33	0,22	11,40	0,73	0,36
		FM-2-5-191029	43,7	19,6	3,37	0,22	11,60	0,66	0,19
	AB	FM-2-6-191029	67,7	22,5	5,51	0,24	11,70	5,75	5,17
		FM-2-7-191029	31,3	20,8	5,67	0,23	11,90	3,41	1,68
		FM-2-8-191029	35,0	20,3	5,74	0,24	12,30	3,37	0,67
		FM-2-9-191029	27,5	20,7	5,82	0,23	12,30	1,04	0,09
		FM-2-10-191029	23,2	19,8	5,71	0,23	12,30	0,63	0,02
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	52,9	16,9	0,05	0,13	9,90	5,09	4,61
		FM-3-2-191105	39,8	13,4	0,05	0,12	9,99	2,25	1,43
		FM-3-3-191105	40,3	13,9	0,05	0,11	10,20	1,38	0,62
		FM-3-4-191105	32,1	13,6	0,06	0,11	10,20	0,59	0,20
		FM-3-5-191105	26,2	13,2	0,07	0,13	10,20	0,41	0,08
	AB	FM-3-6-191105	36,7	9,7	0,21	0,17	6,11	4,81	4,32
		FM-3-7-191105	27,5	9,1	0,21	0,16	6,07	3,70	2,27
		FM-3-8-191105	53,5	9,5	0,17	0,15	6,24	1,85	0,83
		FM-3-9-191105	35,7	9,3	0,19	0,14	6,15	0,82	0,01
		FM-3-10-191105	16,4	9,3	0,24	0,14	6,15	0,56	0,08
PACl	BS	FM-4-1-191105	43,9	38,0	0,04	0,19	11,30	5,00	4,44
		FM-4-2-191105	46,5	15,0	0,03	0,14	11,40	3,13	2,60
		FM-4-3-191105	36,8	14,6	0,06	0,18	11,10	1,43	0,96
		FM-4-4-191105	57,7	14,4	0,06	0,19	11,10	0,87	0,35
		FM-4-5-191105	37,8	15,7	0,04	0,16	11,70	0,43	0,12
	AB	FM-4-6-191105	44,0	17,9	0,85	0,26	11,00	5,61	4,66
		FM-4-7-191105	28,3	15,3	0,93	0,26	11,00	3,50	2,70
		FM-4-8-191105	25,7	15,3	0,94	0,26	11,10	2,08	1,57
		FM-4-9-191105	19,2	14,8	0,93	0,26	11,10	0,77	0,48
		FM-4-10-191105	18,1	14,7	0,95	0,26	11,00	0,47	0,20

		HAUPTIONEN								
		Natrium	Kalium	Calcium	Magnesium	Eisen, ges	Aluminium, ges	Chlorid	Sulfat	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	101,0	25,3	95,9	21,0	0,2	0,0	99,5	37,6
		FM-1-2-191024	100,0	26,4	93,7	19,8	0,4	0,0	126,0	37,7
		FM-1-3-191024	99,8	27,1	94,7	19,3	0,6	0,0	147,0	37,8
		FM-1-4-191024	99,5	27,3	96,3	18,8	0,9	0,0	169,0	37,7
		FM-1-5-191024	105,0	26,5	103,0	19,4	0,7	< 0,01	194,0	37,7
	AB	FM-1-6-191024	103,0	26,6	95,0	18,5	0,1	0,0	98,3	37,8
		FM-1-7-191024	99,9	28,0	89,0	17,3	1,6	< 0,01	124,0	37,7
		FM-1-8-191024	106,0	28,1	92,4	17,6	2,1	< 0,01	146,0	37,7
		FM-1-9-191024	104,0	27,9	90,1	17,2	1,8	< 0,01	168,0	37,7
		FM-1-10-191024	106,0	27,5	93,3	17,5	2,2	< 0,01	192,0	37,5
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	106,0	25,5	83,2	16,6	0,1	0,1	106,0	37,4
		FM-2-2-191029	102,0	27,2	81,1	16,7	0,5	0,0	115,0	63,8
		FM-2-3-191029	98,9	26,9	80,2	16,8	0,7	0,0	121,0	76,4
		FM-2-4-191029	94,3	27,0	79,9	16,8	0,6	0,0	128,0	94,9
		FM-2-5-191029	98,5	27,9	87,3	18,3	0,9	0,0	134,0	110,0
	AB	FM-2-6-191029	96,1	28,8	80,9	16,8	0,2	0,1	105,0	36,9
		FM-2-7-191029	97,5	27,2	80,9	17,2	6,4	0,0	115,0	66,0
		FM-2-8-191029	94,1	27,6	79,3	17,3	7,7	0,0	118,0	75,6
		FM-2-9-191029	91,6	26,3	75,8	17,0	4,3	< 0,01	129,0	95,3
		FM-2-10-191029	89,8	26,3	74,8	17,2	3,9	< 0,01	94,0	81,5
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	97,0	20,9	85,9	15,9	0,2	0,1	87,4	35,2
		FM-3-2-191105	95,5	20,6	84,8	15,9	0,8	0,5	113,0	36,0
		FM-3-3-191105	93,2	20,8	80,8	15,7	1,1	0,6	128,0	36,1
		FM-3-4-191105	95,6	21,7	82,5	15,9	2,3	0,4	147,0	36,5
		FM-3-5-191105	96,8	21,8	86,8	16,3	3,7	0,3	167,0	36,2
	AB	FM-3-6-191105	102,0	21,9	79,0	15,4	0,1	0,1	98,4	37,6
		FM-3-7-191105	100,0	21,1	78,4	15,2	1,7	0,9	118,0	38,1
		FM-3-8-191105	101,0	20,8	82,0	15,7	3,3	1,7	137,0	38,1
		FM-3-9-191105	99,1	20,5	81,1	15,5	5,3	1,6	156,0	38,0
		FM-3-10-191105	101,0	21,2	83,2	15,7	7,7	1,7	175,0	37,8
PACl	BS	FM-4-1-191105	109,0	24,8	91,6	17,8	0,1	0,0	101,0	40,0
		FM-4-2-191105	106,0	23,9	91,5	17,7	0,2	0,4	114,0	40,0
		FM-4-3-191105	104,0	24,2	92,0	18,0	0,1	0,4	126,0	40,0
		FM-4-4-191105	101,0	24,8	92,6	18,1	0,1	0,4	138,0	39,6
		FM-4-5-191105	99,9	24,5	93,7	18,3	0,0	0,3	153,0	40,0
	AB	FM-4-6-191105	99,0	24,5	92,5	18,1	0,1	0,1	103,0	40,0
		FM-4-7-191105	98,3	24,8	90,4	18,1	0,1	1,5	116,0	40,1
		FM-4-8-191105	99,2	25,0	91,4	18,4	0,0	1,7	127,0	39,6
		FM-4-9-191105	97,7	24,6	90,2	18,1	0,0	0,6	141,0	39,8
		FM-4-10-191105	97,5	24,9	91,1	18,2	0,0	1,1	154,0	39,5

		SCHWERMETALLE				
		<i>Blei (Pb)</i>	<i>Cadmium (Cd)</i>	<i>Nickel (Ni)</i>	<i>Quecksilber (Hg)</i>	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-1-2-191024	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-1-3-191024	< 0,005	< 0,001	0,026	0,0001
		FM-1-4-191024	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-1-5-191024	< 0,005	< 0,001	0,037	0,0001
	AB	FM-1-6-191024	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
		FM-1-7-191024	< 0,005	< 0,001	0,005	0,0001
		FM-1-8-191024	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-1-9-191024	< 0,005	< 0,001	0,010	0,0001
		FM-1-10-191024	< 0,005	< 0,001	0,012	0,0001
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-2-2-191029	< 0,005	< 0,001	0,006	0,0001
		FM-2-3-191029	< 0,005	< 0,001	0,006	0,0001
		FM-2-4-191029	< 0,005	< 0,001	0,009	0,0001
		FM-2-5-191029	< 0,005	< 0,001	0,007	0,0001
	AB	FM-2-6-191029	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
		FM-2-7-191029	< 0,005	< 0,001	0,006	0,0001
		FM-2-8-191029	< 0,005	< 0,001	0,007	0,0001
		FM-2-9-191029	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-2-10-191029	< 0,005	< 0,001	0,010	0,0001
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		FM-3-2-191105	< 0,005	< 0,001	0,029	0,0001
		FM-3-3-191105	< 0,005	< 0,001	0,004	0,0001
		FM-3-4-191105	< 0,005	< 0,001	0,004	0,0001
		FM-3-5-191105	< 0,005	< 0,001	0,018	0,0001
	AB	FM-3-6-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001
		FM-3-7-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001
		FM-3-8-191105	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
		FM-3-9-191105	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
		FM-3-10-191105	< 0,005	< 0,001	0,004	0,0001
PACl	BS	FM-4-1-191105	< 0,005	< 0,001	0,007	0,0001
		FM-4-2-191105	< 0,005	< 0,001	0,019	0,0001
		FM-4-3-191105	< 0,005	< 0,001	0,015	0,0001
		FM-4-4-191105	< 0,005	< 0,001	0,015	0,0001
		FM-4-5-191105	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
	AB	FM-4-6-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001
		FM-4-7-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001
		FM-4-8-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,000
		FM-4-9-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001
		FM-4-10-191105	< 0,005	< 0,001	< 0,003	0,0001

		ARZNEISTOFFE						
		<i>Carbamazepin</i>	<i>Ciprofloxacin</i>	<i>Coffein</i>	<i>Diclofenac</i>	<i>Gabapentin</i>	<i>Ibuprofen</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	0,590	0,170	0,030	2,500	1,400	< 0,05
		FM-1-2-191024	0,520	0,090	0,020	2,300	1,300	< 0,05
		FM-1-3-191024	0,570	0,070	< 0,02	2,200	1,400	< 0,05
		FM-1-4-191024	0,500	0,050	0,020	2,200	1,500	< 0,05
		FM-1-5-191024	0,550	0,040	0,030	1,900	1,500	< 0,05
	AB	FM-1-6-191024	0,600	0,150	0,030	2,400	1,900	< 0,05
		FM-1-7-191024	0,570	0,100	0,030	2,400	1,800	< 0,05
		FM-1-8-191024	0,590	0,050	0,030	2,400	1,800	< 0,05
		FM-1-9-191024	0,600	< 0,02	0,030	2,300	1,900	< 0,05
		FM-1-10-191024	0,590	< 0,02	0,030	2,300	1,800	< 0,05
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	0,540	0,200	0,050	3,000	1,400	< 0,05
		FM-2-2-191029	0,510	0,150	0,040	3,000	1,300	< 0,05
		FM-2-3-191029	0,600	0,110	0,030	2,600	1,400	< 0,05
		FM-2-4-191029	0,530	0,080	0,050	2,400	1,400	< 0,05
		FM-2-5-191029	0,510	0,080	0,040	2,500	1,400	< 0,05
	AB	FM-2-6-191029	0,530	0,230	0,060	2,900	1,400	< 0,05
		FM-2-7-191029	0,560	0,120	0,060	2,800	1,400	< 0,05
		FM-2-8-191029	0,520	0,070	0,050	2,700	1,400	< 0,05
		FM-2-9-191029	0,540	0,030	0,040	3,100	1,300	< 0,05
		FM-2-10-191029	0,530	< 0,02	0,040	3,100	1,400	< 0,05
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	0,510	0,130	0,030	1,900	1,300	< 0,05
		FM-3-2-191105	0,520	0,050	< 0,02	1,700	1,300	< 0,05
		FM-3-3-191105	0,460	< 0,02	0,030	1,500	1,300	< 0,05
		FM-3-4-191105	0,500	< 0,02	0,030	1,400	1,300	< 0,05
		FM-3-5-191105	0,640	< 0,02	< 0,02	1,700	1,300	< 0,05
	AB	FM-3-6-191105	0,530	0,160	0,040	2,300	1,400	< 0,05
		FM-3-7-191105	0,490	0,060	0,050	2,300	1,400	< 0,05
		FM-3-8-191105	0,480	< 0,02	0,020	2,100	1,400	< 0,05
		FM-3-9-191105	0,470	< 0,02	0,040	2,000	1,200	< 0,05
		FM-3-10-191105	0,470	< 0,02	0,070	2,000	1,300	< 0,05
PACl	BS	FM-4-1-191105	0,730	0,340	0,040	2,500	3,300	< 0,05
		FM-4-2-191105	0,720	0,260	0,030	2,500	3,200	< 0,05
		FM-4-3-191105	0,730	0,150	0,020	2,200	3,200	< 0,05
		FM-4-4-191105	0,670	0,130	< 0,02	2,200	3,300	< 0,05
		FM-4-5-191105	0,710	0,110	< 0,02	2,000	3,200	< 0,05
	AB	FM-4-6-191105	0,640	0,330	0,080	2,400	3,300	< 0,05
		FM-4-7-191105	0,710	0,230	0,070	2,200	3,300	< 0,05
		FM-4-8-191105	0,660	0,170	0,070	2,500	3,100	< 0,05
		FM-4-9-191105	0,650	0,140	0,080	2,100	3,300	< 0,05
		FM-4-10-191105	0,720	0,080	0,060	2,800	3,300	< 0,05

		ARZNEISTOFFE						
		<i>Iopamidol</i>	<i>Metformin</i>	<i>Metoprolol</i>	<i>Oxytetracyclin</i>	<i>Sulfamethoxazol</i>	<i>Trimethoprim</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	< 0,04	0,450	2,700	< 0,02	0,530	0,350
		FM-1-2-191024	< 0,04	0,500	2,800	< 0,02	0,500	0,340
		FM-1-3-191024	< 0,04	0,520	2,900	< 0,02	0,500	0,320
		FM-1-4-191024	< 0,04	0,590	2,900	< 0,02	0,470	0,330
		FM-1-5-191024	< 0,04	0,620	2,800	< 0,02	0,460	0,320
	AB	FM-1-6-191024	< 0,04	1,300	2,900	< 0,02	0,610	0,350
		FM-1-7-191024	< 0,04	1,300	2,800	< 0,02	0,550	0,340
		FM-1-8-191024	< 0,04	1,300	2,900	< 0,02	0,580	0,350
		FM-1-9-191024	< 0,04	1,300	2,900	< 0,02	0,540	0,350
		FM-1-10-191024	< 0,04	1,200	2,900	< 0,02	0,500	0,350
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	< 0,04	0,230	2,600	< 0,02	0,670	0,410
		FM-2-2-191029	< 0,04	0,260	2,300	< 0,02	0,560	0,380
		FM-2-3-191029	< 0,04	0,310	2,500	< 0,02	0,650	0,410
		FM-2-4-191029	< 0,04	0,310	2,300	< 0,02	0,580	0,370
		FM-2-5-191029	< 0,04	0,330	2,400	< 0,02	0,580	0,390
	AB	FM-2-6-191029	< 0,04	0,450	2,500	< 0,02	0,710	0,430
		FM-2-7-191029	< 0,04	0,770	2,500	< 0,02	0,630	0,430
		FM-2-8-191029	< 0,04	0,920	2,700	< 0,02	0,790	0,400
		FM-2-9-191029	< 0,04	1,000	2,800	< 0,02	1,000	0,410
		FM-2-10-191029	< 0,04	1,000	3,200	< 0,02	0,840	0,410
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	< 0,04	0,360	1,900	< 0,02	0,660	0,340
		FM-3-2-191105	< 0,04	0,340	2,000	< 0,02	0,700	0,360
		FM-3-3-191105	< 0,04	0,360	2,000	< 0,02	0,670	0,340
		FM-3-4-191105	< 0,04	0,500	2,100	< 0,02	0,710	0,340
		FM-3-5-191105	< 0,04	0,510	2,600	< 0,02	0,850	0,430
	AB	FM-3-6-191105	< 0,04	0,680	2,600	< 0,02	0,740	0,390
		FM-3-7-191105	< 0,04	0,680	2,200	< 0,02	0,670	0,370
		FM-3-8-191105	< 0,04	0,750	2,200	< 0,02	0,690	0,360
		FM-3-9-191105	< 0,04	0,720	2,200	< 0,02	0,720	0,360
		FM-3-10-191105	< 0,04	0,780	2,200	< 0,02	0,640	0,330
PACl	BS	FM-4-1-191105	< 0,04	0,550	3,200	< 0,02	0,770	0,510
		FM-4-2-191105	< 0,04	0,620	3,000	< 0,02	0,710	0,480
		FM-4-3-191105	< 0,04	0,650	3,000	< 0,02	0,700	0,450
		FM-4-4-191105	< 0,04	0,660	3,000	< 0,02	0,730	0,470
		FM-4-5-191105	< 0,04	0,720	3,200	< 0,02	0,720	0,470
	AB	FM-4-6-191105	< 0,04	1,100	3,300	< 0,02	0,660	0,500
		FM-4-7-191105	< 0,04	1,100	3,100	< 0,02	0,650	0,480
		FM-4-8-191105	< 0,04	1,100	3,300	< 0,02	0,690	0,510
		FM-4-9-191105	< 0,04	1,200	3,400	< 0,02	0,740	0,530
		FM-4-10-191105	< 0,04	1,300	3,300	< 0,02	0,600	0,520

		PFLANZENSCHUTZMITTEL							
		<i>Aclonifen</i>	<i>Bifenox</i>	<i>Cybutryn (Irgarol)</i>	<i>Cypermethrin</i>	<i>Dichlorvos</i>	<i>Dicofol</i>	<i>Diuron</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-2-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-3-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-4-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-5-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	AB	FM-1-6-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-7-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-8-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-9-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-1-10-191024	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-2-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-3-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-4-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-5-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	AB	FM-2-6-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-7-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-8-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-9-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-2-10-191029	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-2-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-3-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-4-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-5-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	AB	FM-3-6-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-7-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-8-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-9-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-3-10-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
PACl	BS	FM-4-1-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-2-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-3-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-4-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-5-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	AB	FM-4-6-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-7-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-8-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-9-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		FM-4-10-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02

		PFLANZENSCHUTZMITTEL							
		<i>Glyphosat</i>	<i>Imidacloprid</i>	<i>Isoproturon</i>	<i>Quinoxifen</i>	<i>Terbutylazin</i>	<i>Terbutryn</i>	<i>Triclosan</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	3,760	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-2-191024	4,490	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-3-191024	0,710	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-4-191024	0,500	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-5-191024	0,530	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	AB	FM-1-6-191024	2,170	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-7-191024	3,210	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-8-191024	1,020	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-9-191024	0,390	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-1-10-191024	1,810	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	3,220	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-2-191029	2,380	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-3-191029	1,580	0,070	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-4-191029	2,240	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-5-191029	1,480	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	AB	FM-2-6-191029	7,310	0,070	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-7-191029	5,860	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-8-191029	3,920	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-9-191029	1,970	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-2-10-191029	2,520	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	1,450	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-2-191105	1,010	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-3-191105	0,960	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-4-191105	0,700	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-5-191105	0,130	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	AB	FM-3-6-191105	4,930	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-7-191105	4,310	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-8-191105	2,670	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-9-191105	0,290	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-3-10-191105	1,060	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
PACl	BS	FM-4-1-191105	1,530	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-2-191105	1,350	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-3-191105	0,620	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-4-191105	0,590	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-5-191105	0,670	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	AB	FM-4-6-191105	1,470	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-7-191105	1,990	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-8-191105	1,680	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-9-191105	1,720	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		FM-4-10-191105	0,950	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05

		PAKs								
		<i>Acenaphthen</i>	<i>Acenaphthylene</i>	<i>Anthracen</i>	<i>Benzo[a]anthracen</i>	<i>Benzo[a]pyren</i>	<i>Benzo[b]fluoranthen</i>	<i>Benzo[ghi]perylen</i>	<i>Benzo[k]fluoranthen</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-2-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-3-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-4-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-5-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	AB	FM-1-6-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-7-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-8-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-9-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-1-10-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-2-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-3-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-4-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-5-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	0,020	< 0,01	< 0,01
	AB	FM-2-6-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-7-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-8-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-9-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-2-10-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-2-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-3-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-5-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	AB	FM-3-6-191105	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-7-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-8-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-9-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-3-10-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
PACl	BS	FM-4-1-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-2-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-3-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-5-191105	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	AB	FM-4-6-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-7-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-8-191105	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-9-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		FM-4-10-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

		PAKs								
		<i>Chrysen</i>	<i>Dibenz[ah]anthracen</i>	<i>Fluoranthen</i>	<i>Fluoren</i>	<i>Indeno[1,2,3-cd]pyren</i>	<i>Naphthalin</i>	<i>Phenanthren</i>	<i>Pyren</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
		FM-1-2-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	< 0,01
		FM-1-3-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	< 0,01
		FM-1-4-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
		FM-1-5-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	AB	FM-1-6-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
		FM-1-7-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01
		FM-1-8-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,010	< 0,01
		FM-1-9-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,010	< 0,01
		FM-1-10-191024	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,030	0,050	0,010
		FM-2-2-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,040	< 0,01
		FM-2-3-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-2-4-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-2-5-191029	0,030	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	0,020	0,040	0,040
	AB	FM-2-6-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
		FM-2-7-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-2-8-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-2-9-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,040	0,040	< 0,01
		FM-2-10-191029	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,030	< 0,01
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,030	< 0,01
		FM-3-2-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	< 0,01
		FM-3-3-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-3-4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,040	< 0,01
		FM-3-5-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
	AB	FM-3-6-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-3-7-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
		FM-3-8-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01
		FM-3-9-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01
		FM-3-10-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
PACl	BS	FM-4-1-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,020	< 0,01
		FM-4-2-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		FM-4-3-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
		FM-4-4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01
		FM-4-5-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,040	< 0,01
	AB	FM-4-6-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
		FM-4-7-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,030	< 0,01
		FM-4-8-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01
		FM-4-9-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,090	0,030	< 0,01
		FM-4-10-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,040	< 0,01	< 0,01

		SONSTIGE				
		<i>Acesulfam-K</i>	<i>Bisphenol A</i>	<i>Benzotriazol</i>	<i>PFOS</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
FeCl <sub>3</sub>	BS	FM-1-1-191024	0,190	< 0,05	11,000	< 0,05
		FM-1-2-191024	0,200	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-3-191024	0,230	< 0,05	11,000	< 0,05
		FM-1-4-191024	0,230	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-5-191024	0,200	< 0,05	10,000	< 0,05
	AB	FM-1-6-191024	0,630	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-7-191024	0,690	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-8-191024	0,670	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-9-191024	0,710	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-1-10-191024	0,650	< 0,05	10,000	< 0,05
FeClSO <sub>4</sub>	BS	FM-2-1-191029	0,200	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-2-191029	0,200	< 0,05	11,000	< 0,05
		FM-2-3-191029	0,260	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-4-191029	0,260	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-5-191029	0,270	< 0,05	11,000	< 0,05
	AB	FM-2-6-191029	0,380	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-7-191029	0,570	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-8-191029	0,610	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-9-191029	0,640	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-2-10-191029	0,710	< 0,05	11,000	< 0,05
AlCl <sub>3</sub>	BS	FM-3-1-191105	0,170	< 0,05	8,300	< 0,05
		FM-3-2-191105	0,130	< 0,05	8,600	< 0,05
		FM-3-3-191105	0,140	< 0,05	8,500	< 0,05
		FM-3-4-191105	0,170	< 0,05	7,900	< 0,05
		FM-3-5-191105	0,190	< 0,05	8,300	< 0,05
	AB	FM-3-6-191105	0,390	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-3-7-191105	0,480	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-3-8-191105	0,460	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-3-9-191105	0,410	< 0,05	10,000	< 0,05
		FM-3-10-191105	0,440	< 0,05	9,400	< 0,05
PACl	BS	FM-4-1-191105	1,100	0,070	9,400	< 0,05
		FM-4-2-191105	1,100	< 0,05	9,800	< 0,05
		FM-4-3-191105	1,200	0,060	10,000	< 0,05
		FM-4-4-191105	1,200	0,060	9,800	< 0,05
		FM-4-5-191105	1,100	0,090	9,300	< 0,05
	AB	FM-4-6-191105	1,500	< 0,05	8,700	< 0,05
		FM-4-7-191105	1,700	0,070	9,300	< 0,05
		FM-4-8-191105	1,600	< 0,05	9,000	< 0,05
		FM-4-9-191105	1,700	< 0,05	9,500	< 0,05
		FM-4-10-191105	1,800	< 0,05	9,500	< 0,05

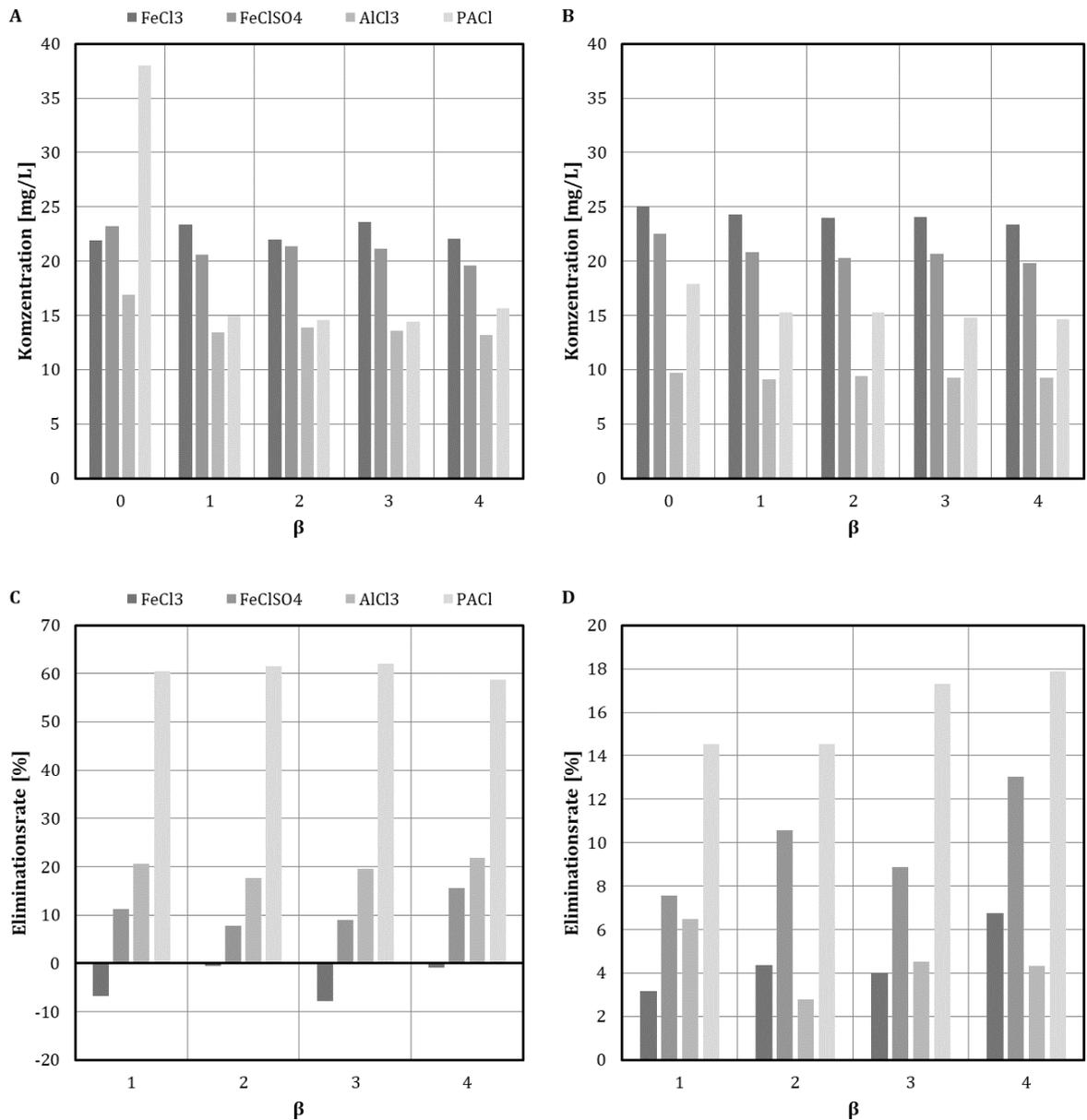
## 2 Grafische Darstellung

Vorbemerkungen:

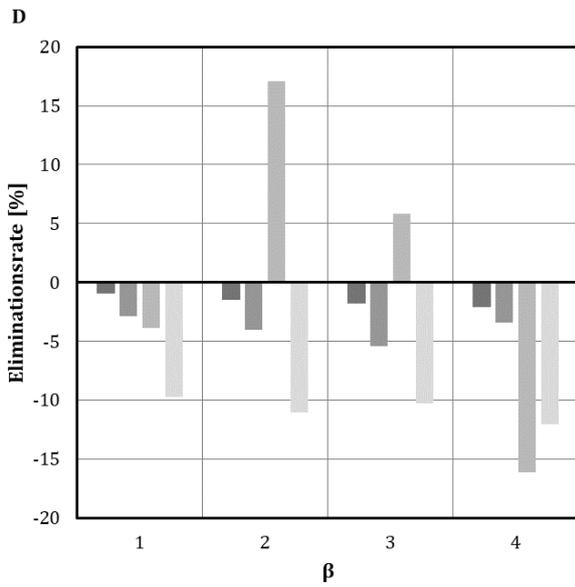
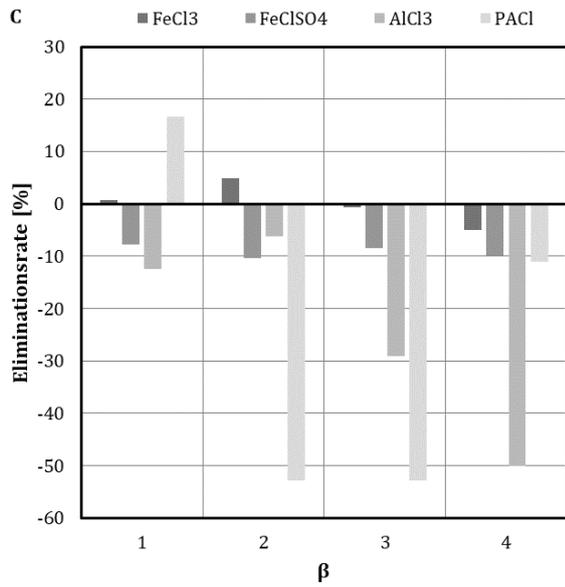
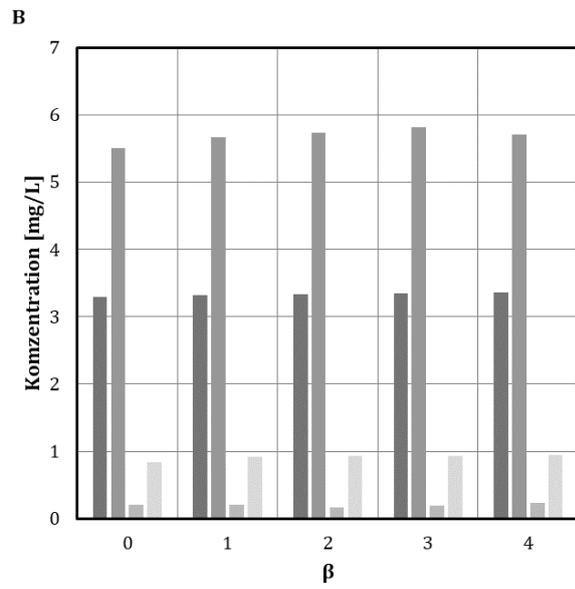
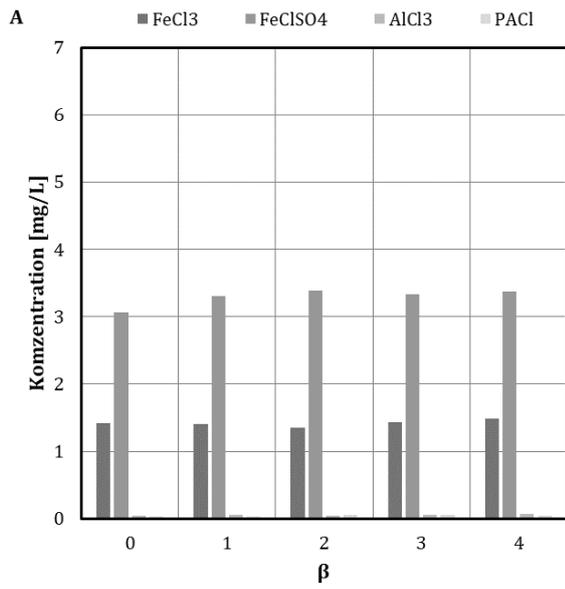
Die folgenden Diagramme sind jeweils in 4er-Blöcken zusammengefasst. Hierbeistellen die ersten beiden Blöcke die Konzentrationen zusammen (A: Belebtschlamm, B: Klarwasser). Die unteren Diagramme geben die korrespondierenden Eliminationsraten an (C: Belebtschlamm, D: Klarwasser). Diese beziehen sich auf den jeweiligen Nulltest ( $\beta = 0$ ).

### 2.1 Nähr- und Zehrstoffe

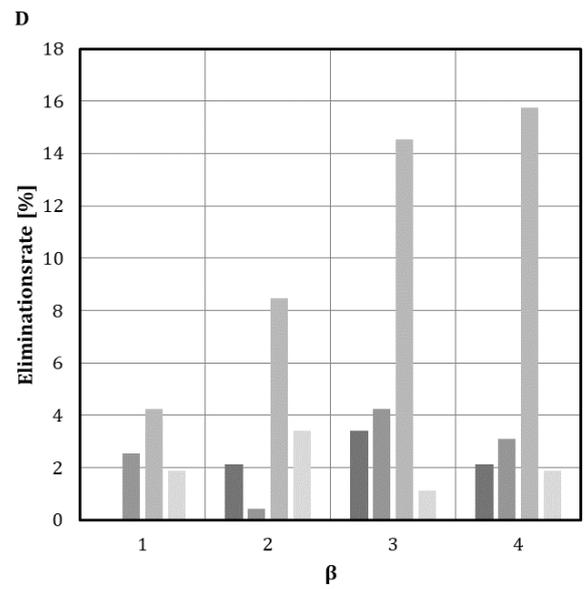
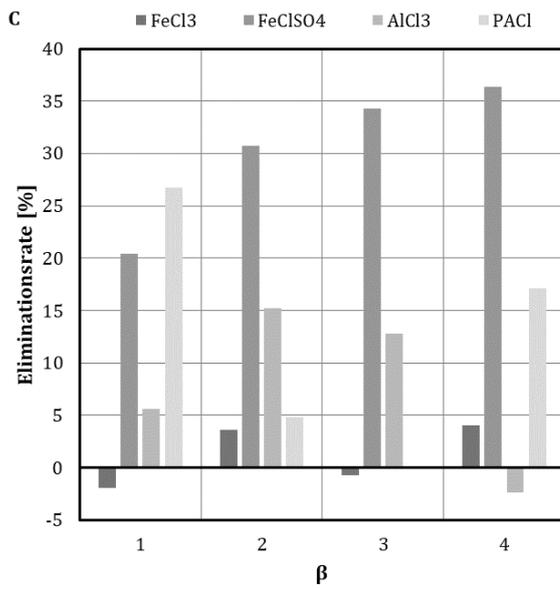
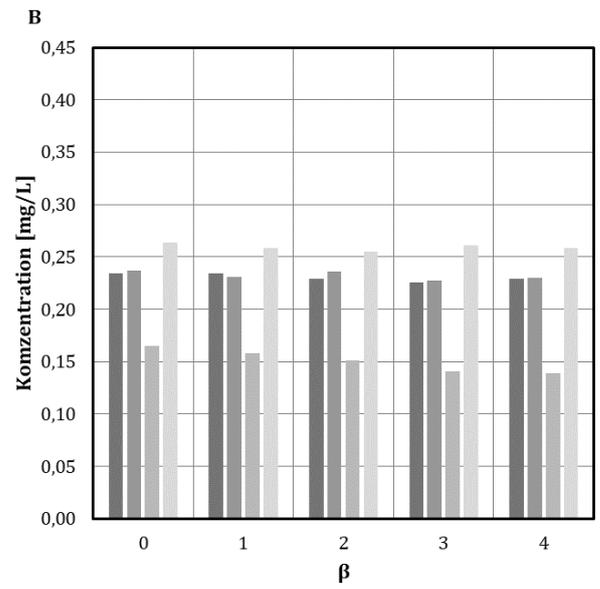
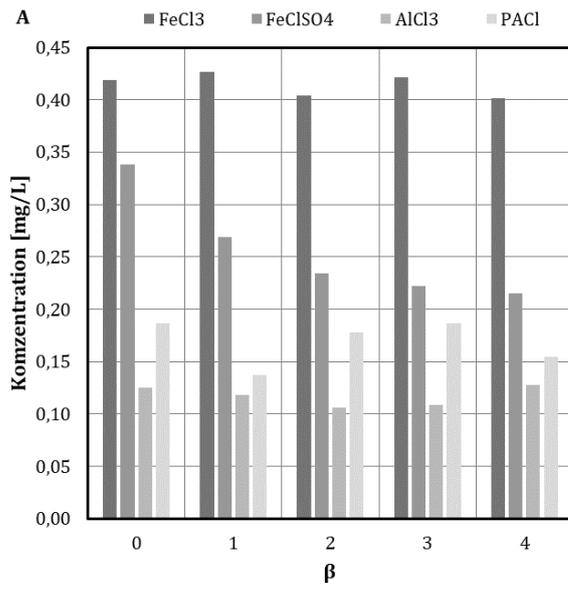
Gesamt-Stickstoff



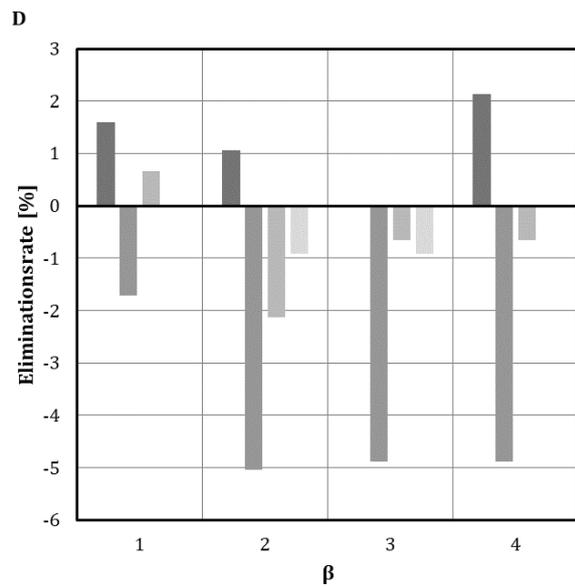
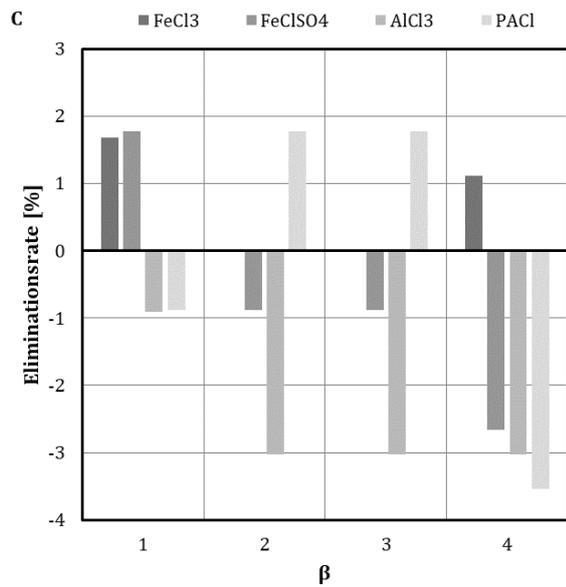
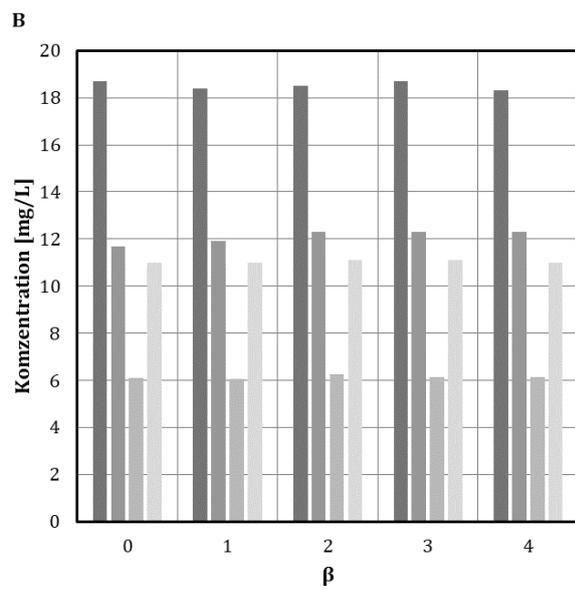
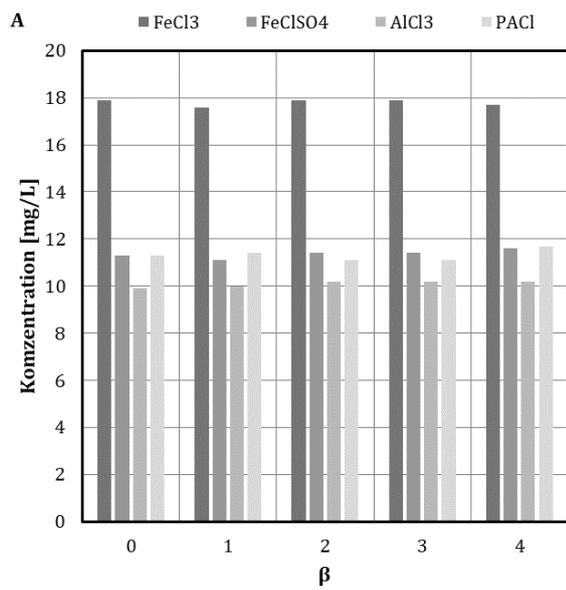
Ammonium-Stickstoff



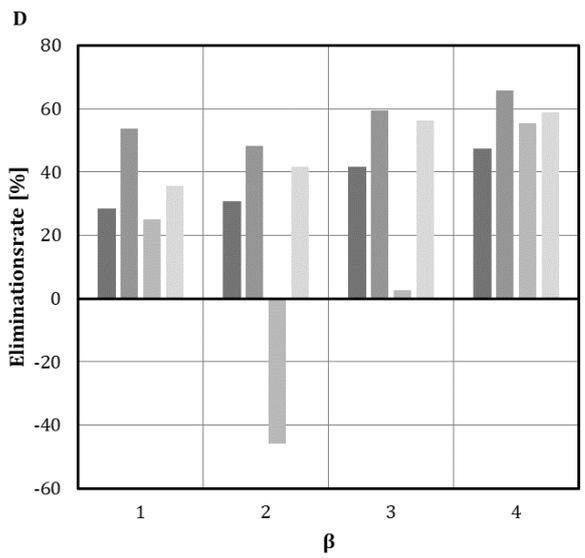
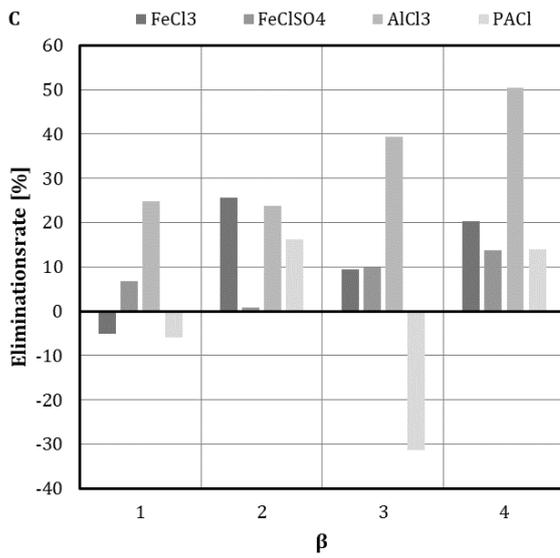
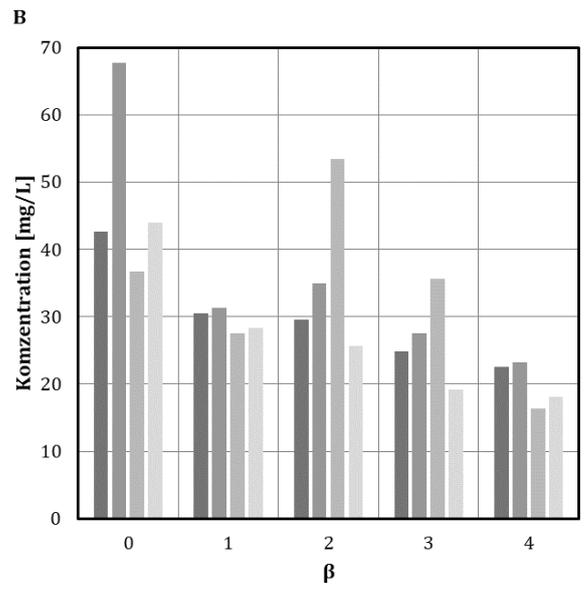
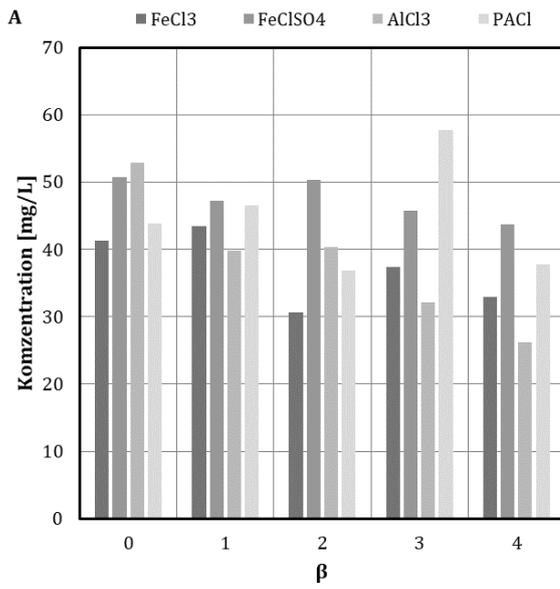
Nitrit-Stickstoff



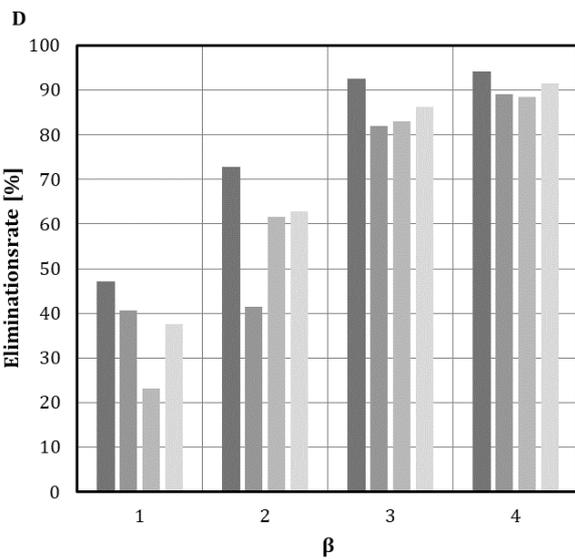
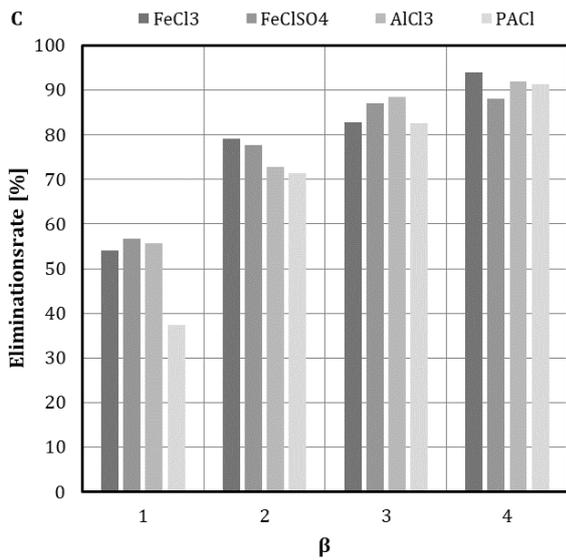
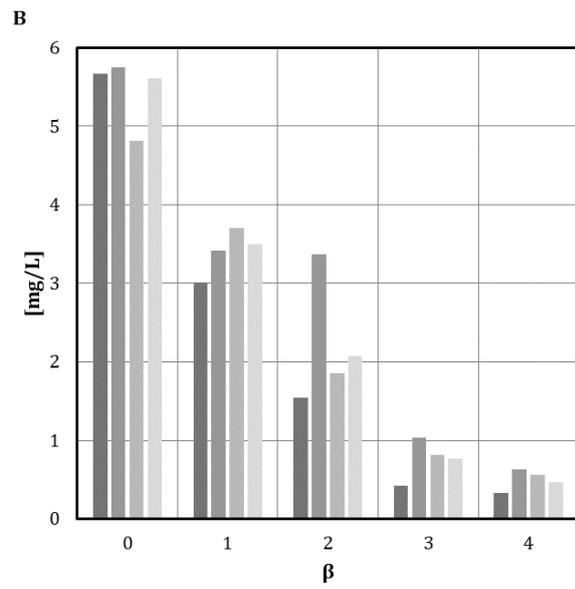
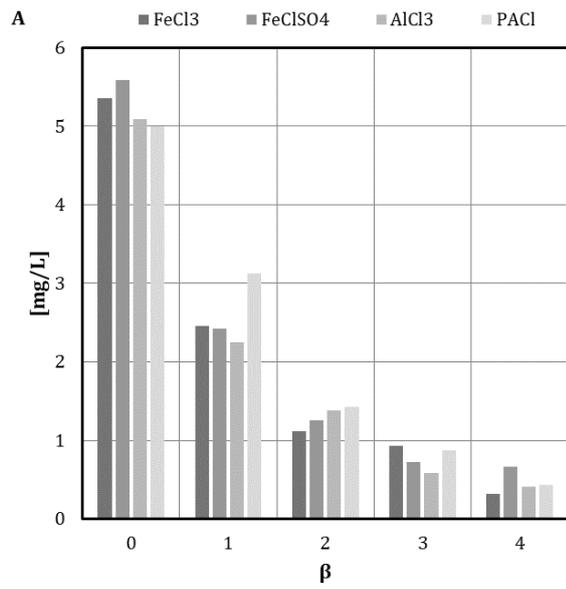
Nitrat-Stickstoff



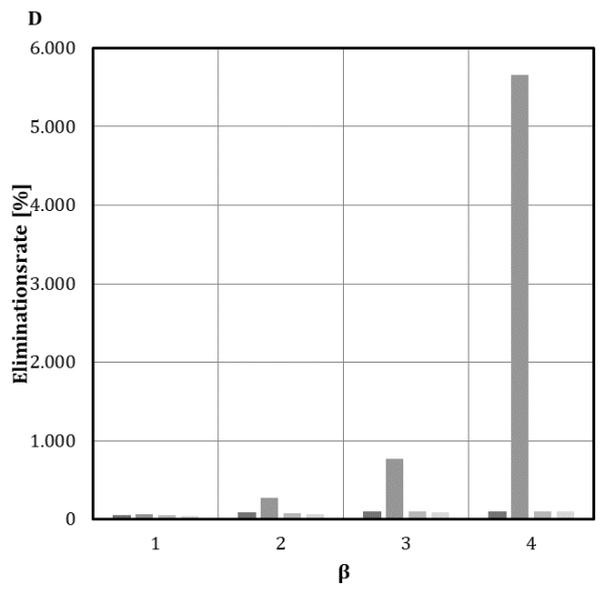
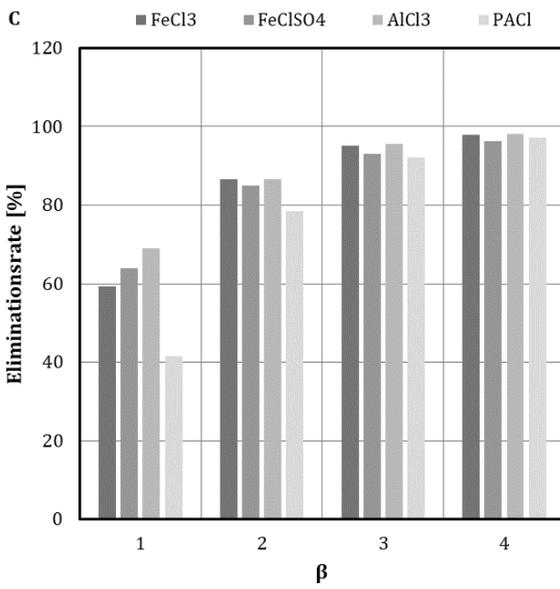
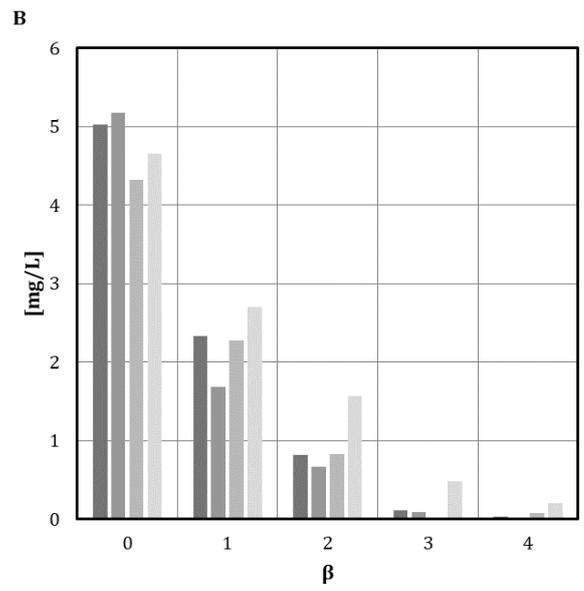
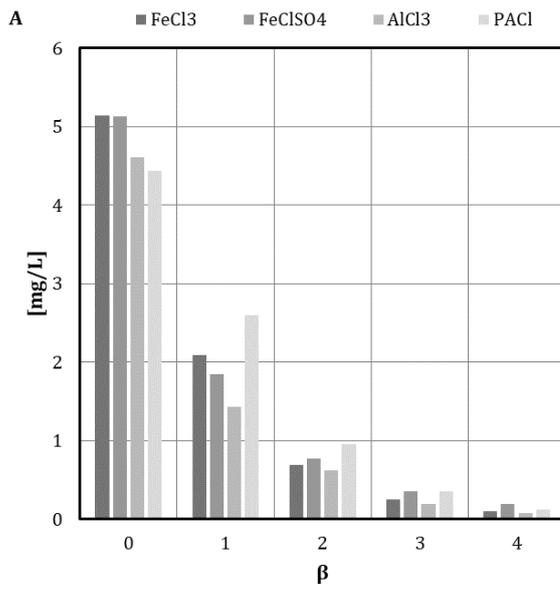
CSB



Gesamt-Phosphor

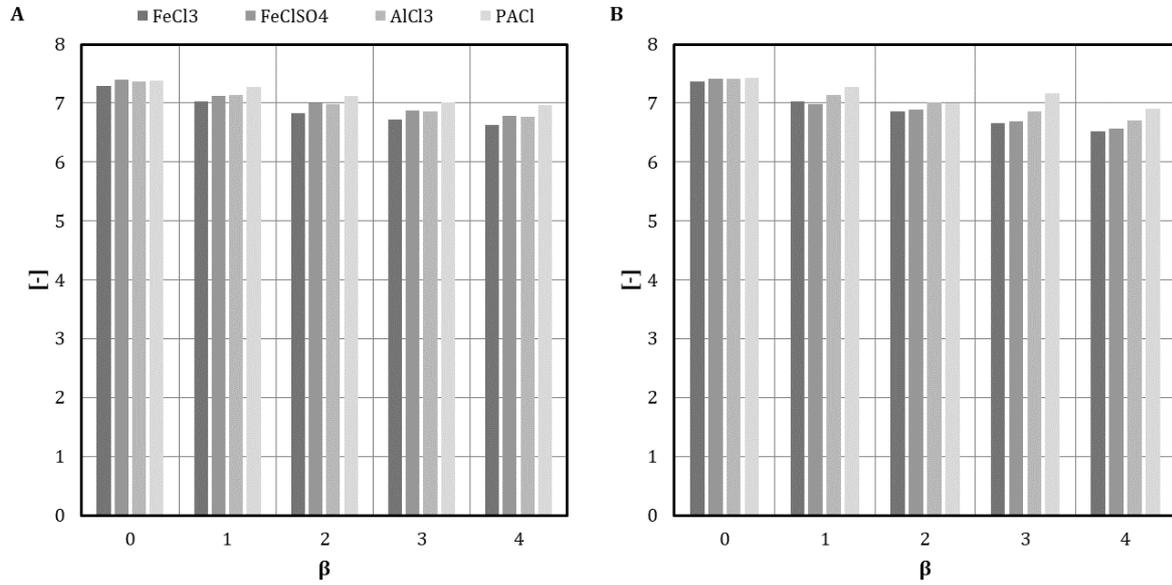


Ortho-Phosphat

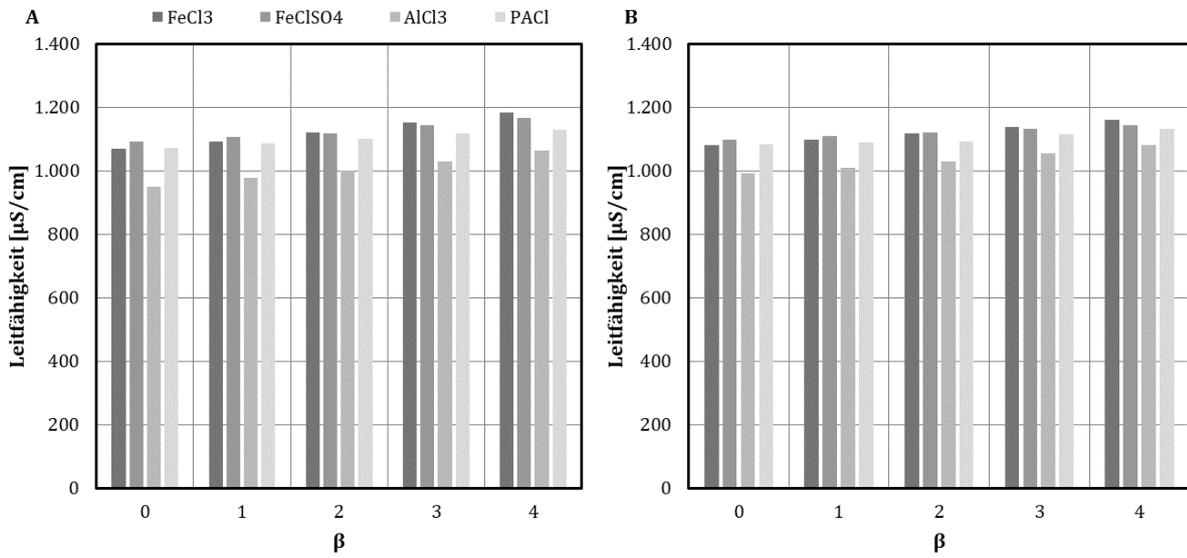


## 2.2 Begleitparameter

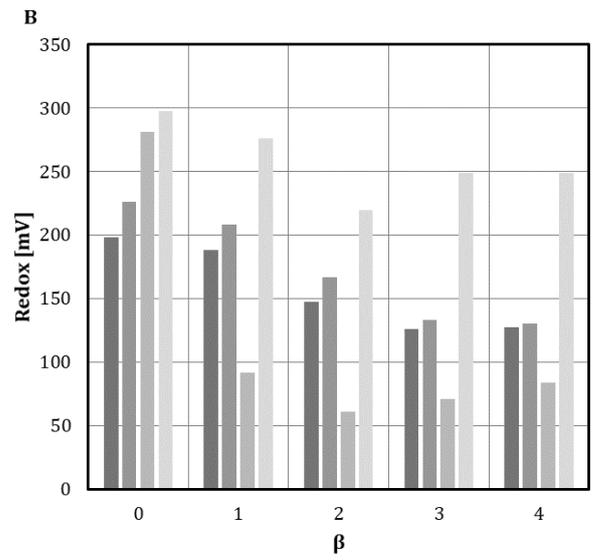
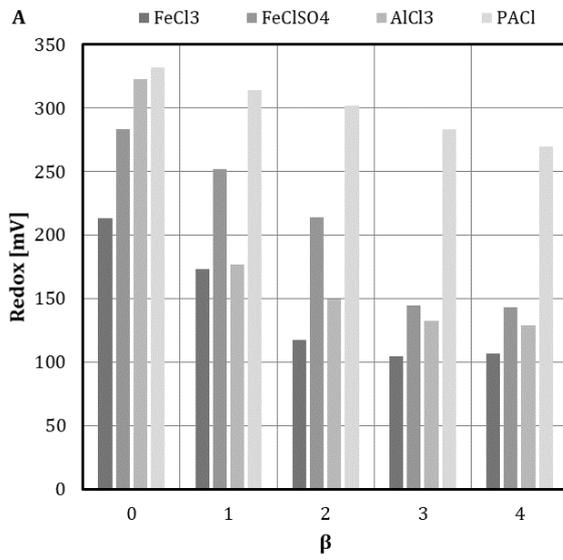
### pH-Wert



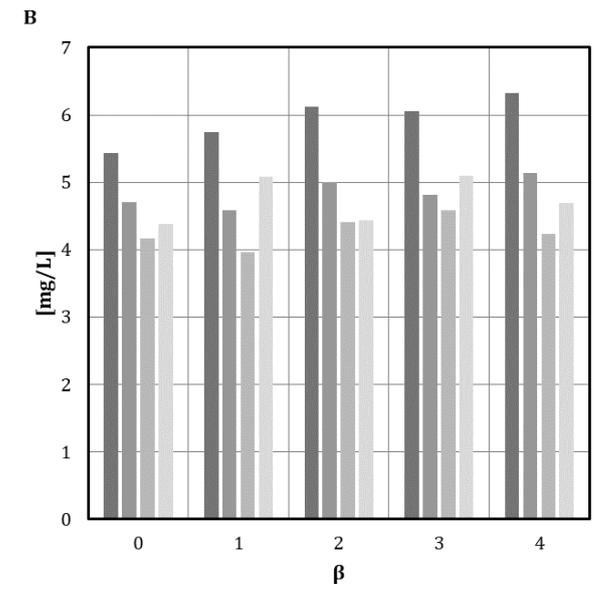
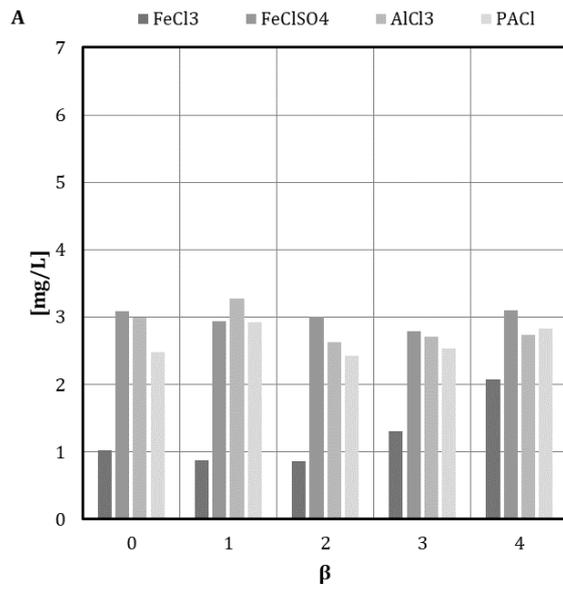
### Leitfähigkeit



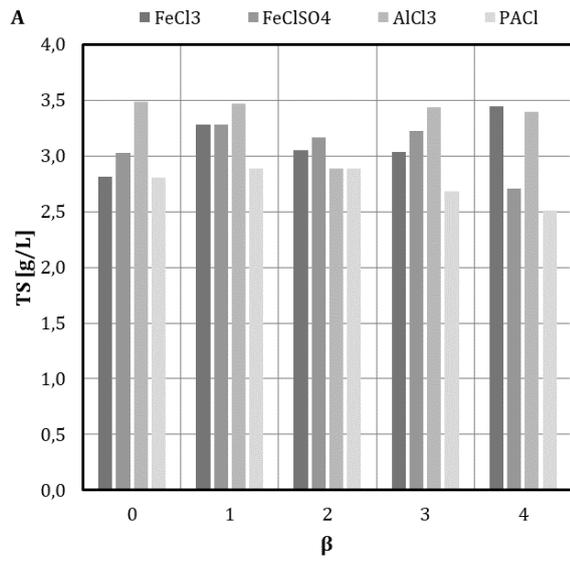
*Redox-Potenzial*



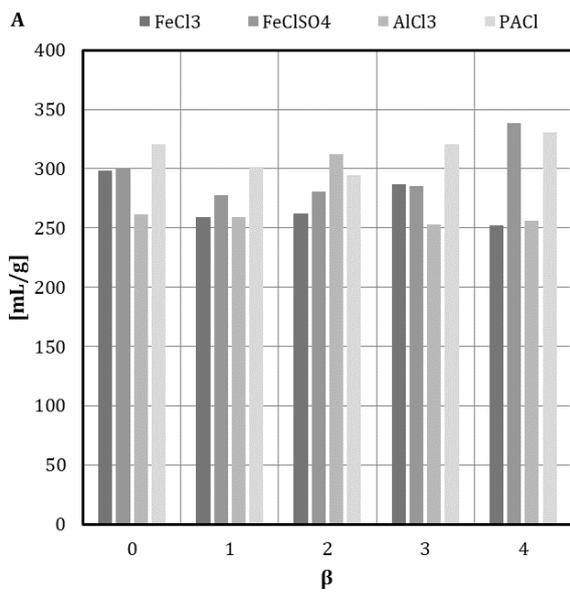
*Sauerstoff*



*Trockensubstanzgehalt im Belebtschlamm*

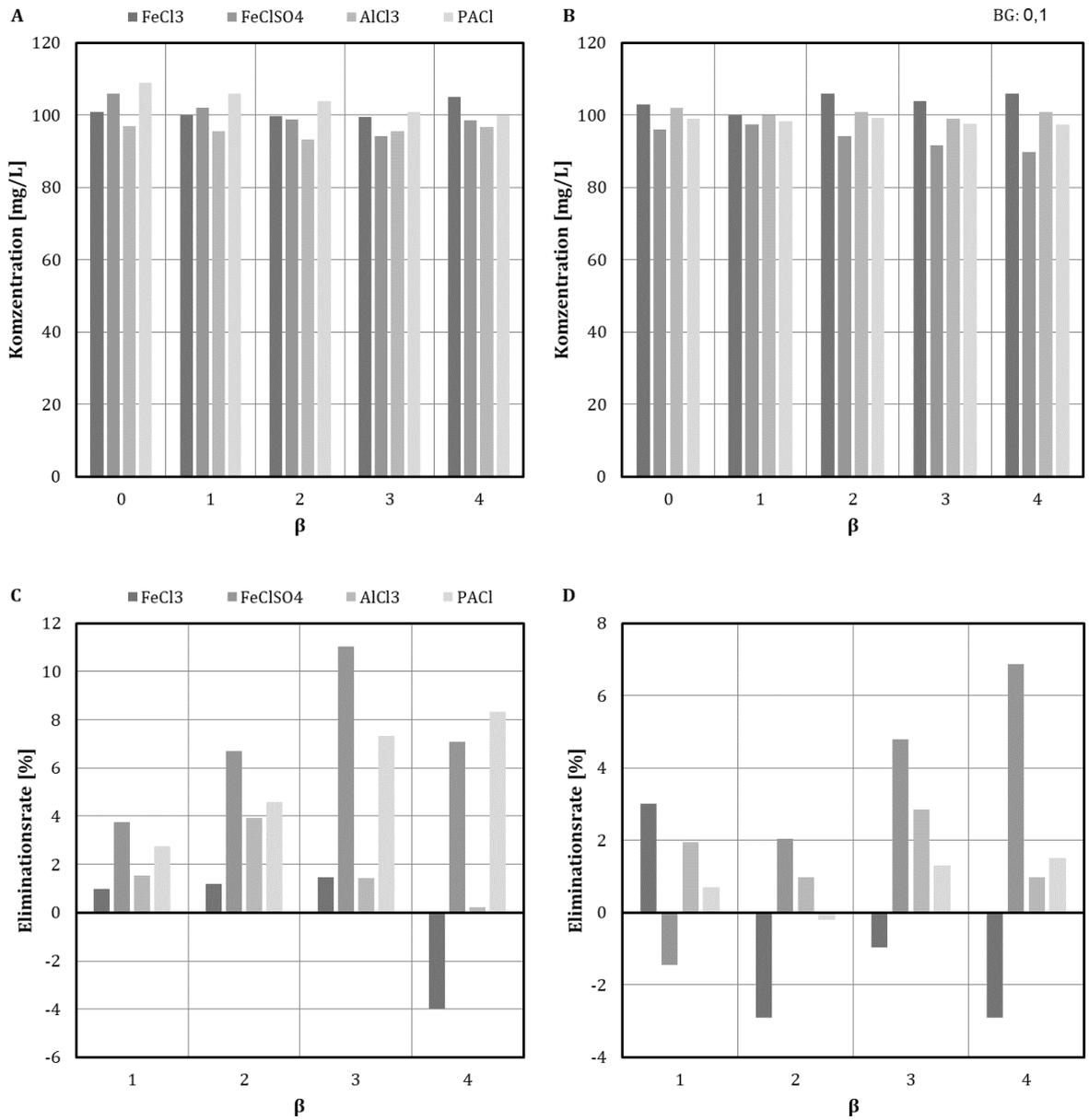


*Schlammindex ISV*

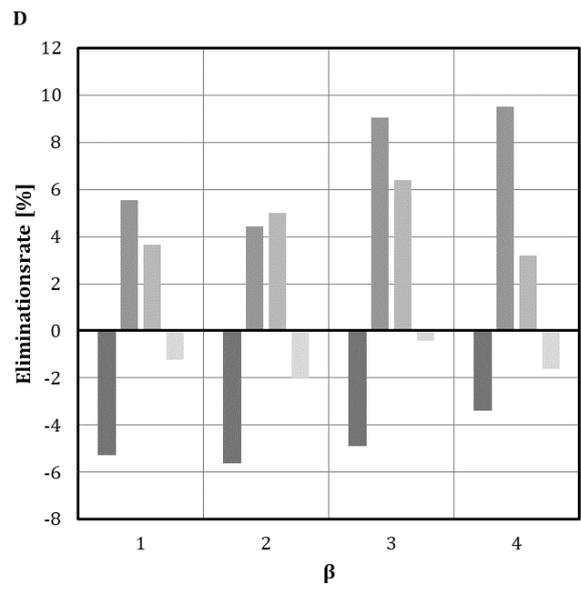
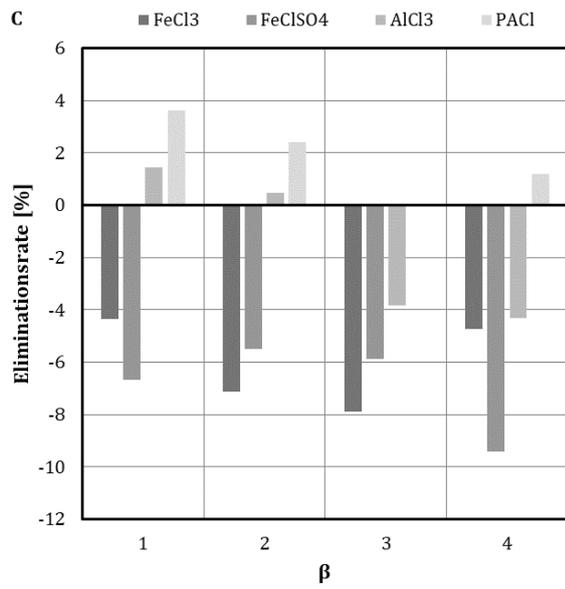
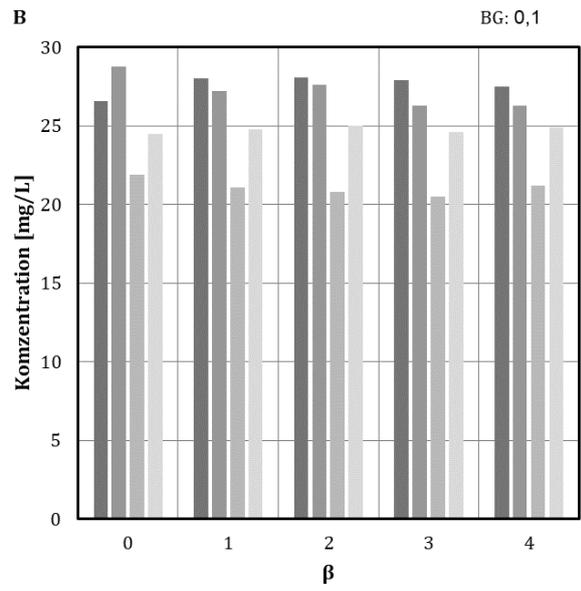
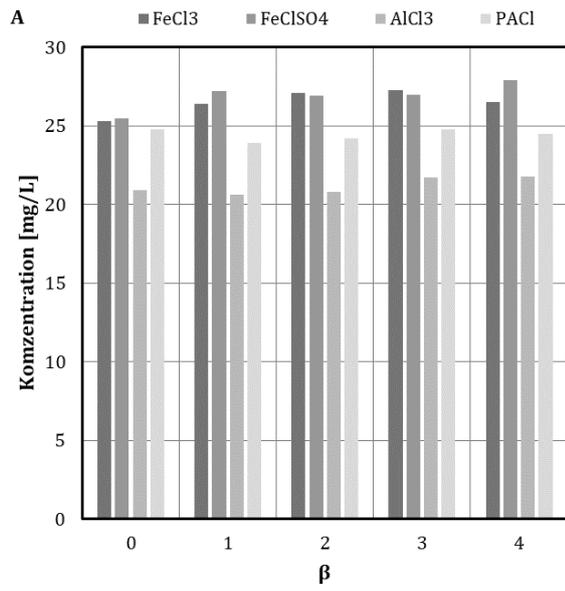


## 2.3 Hauptionen

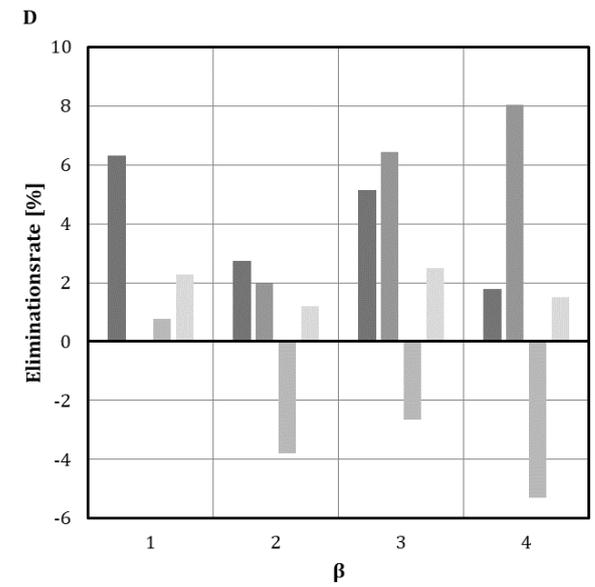
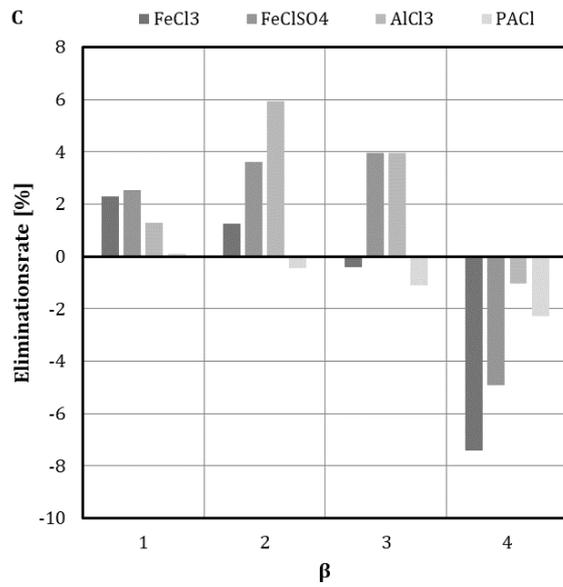
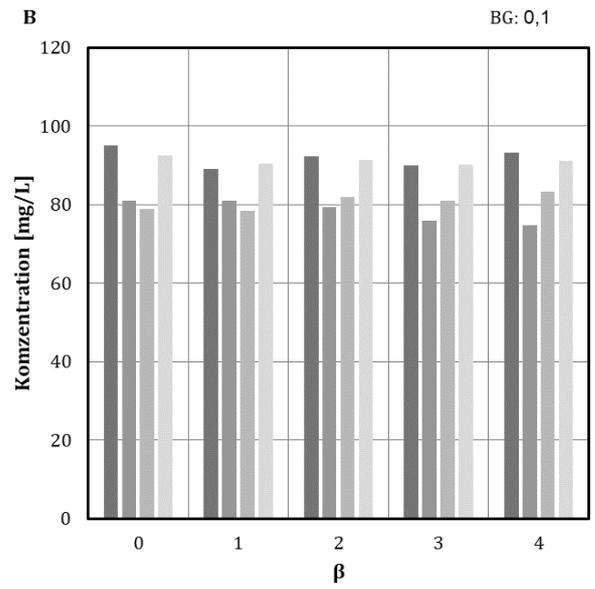
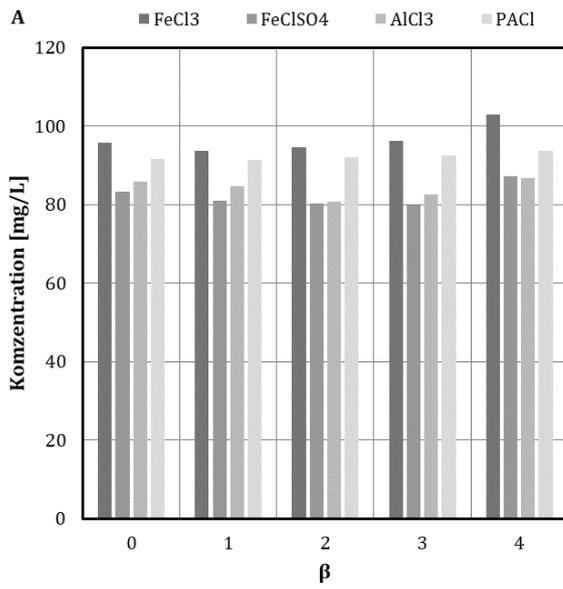
### Natrium



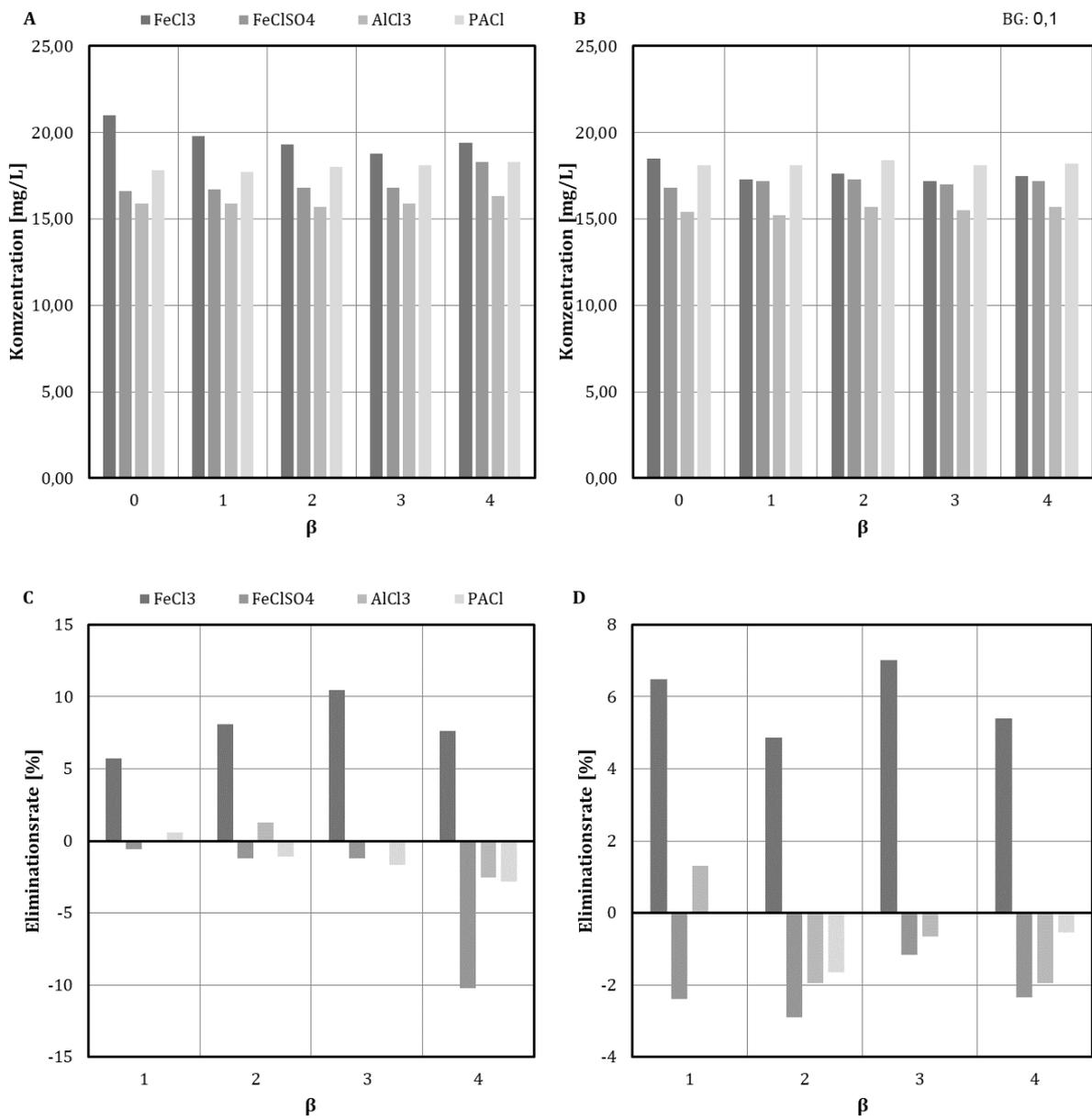
Kalium



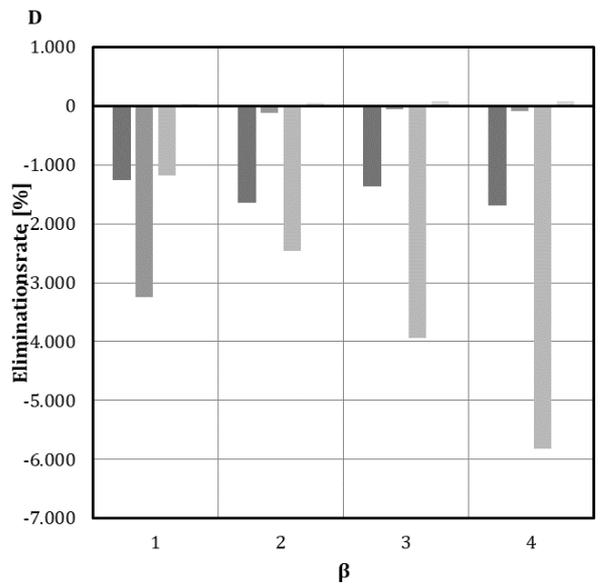
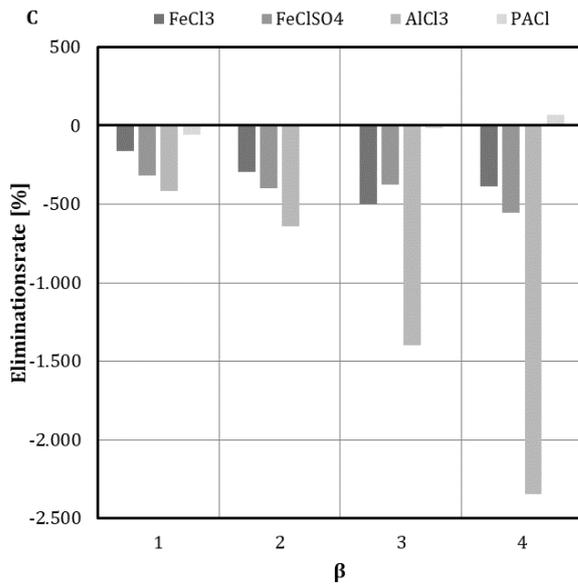
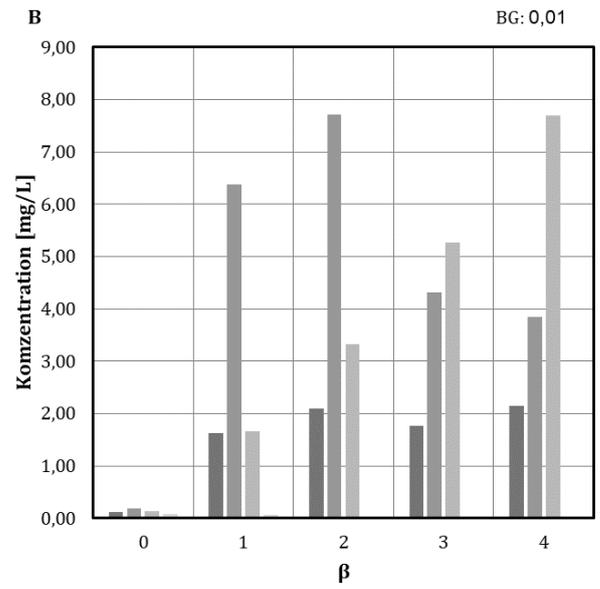
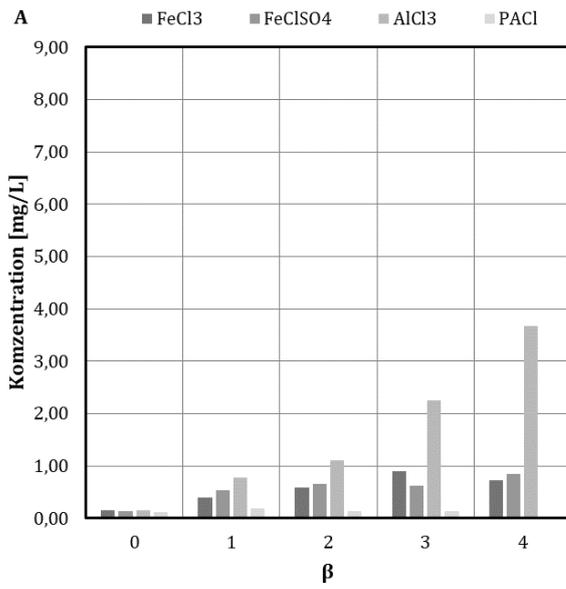
Calcium



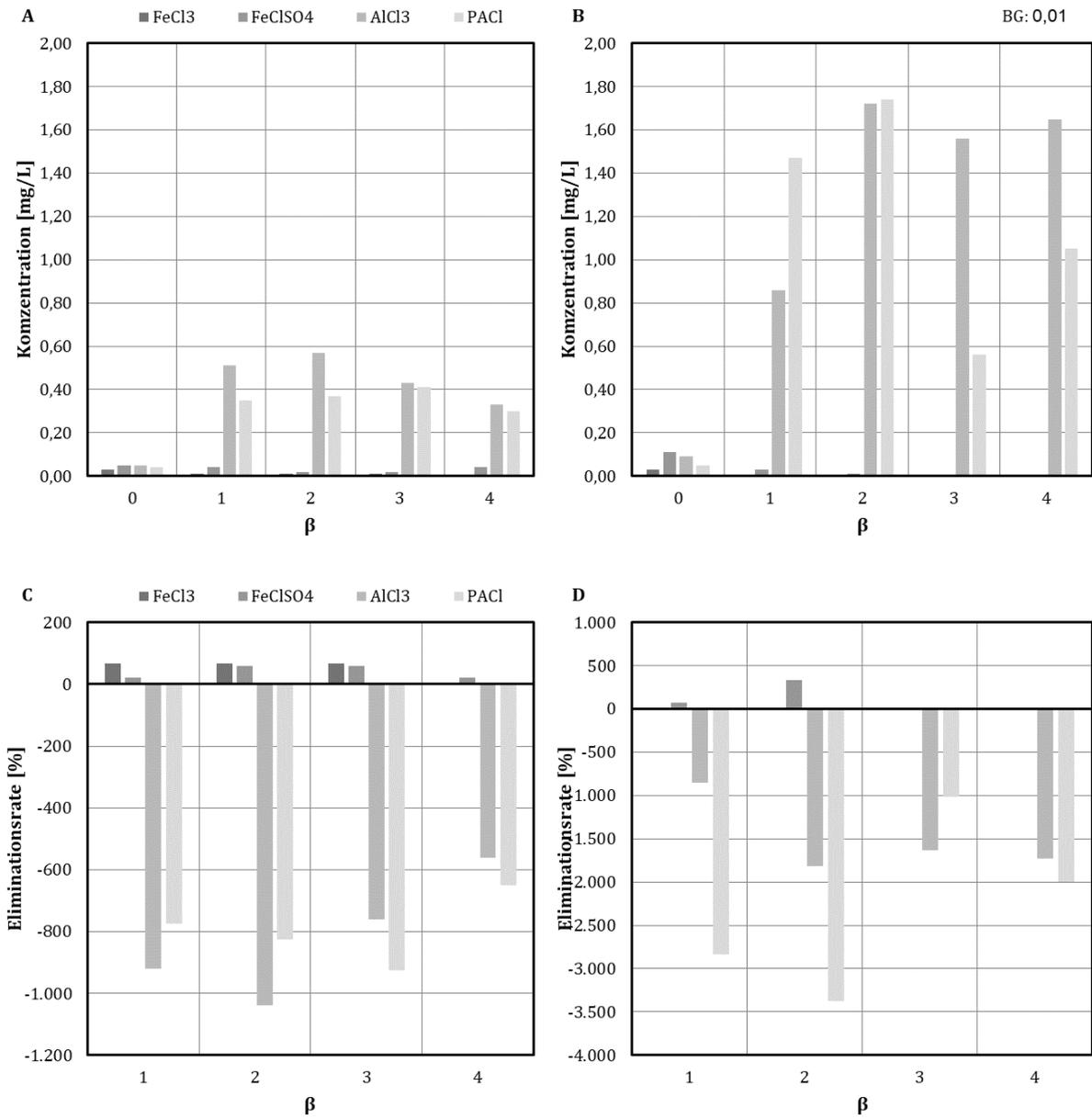
Magnesium



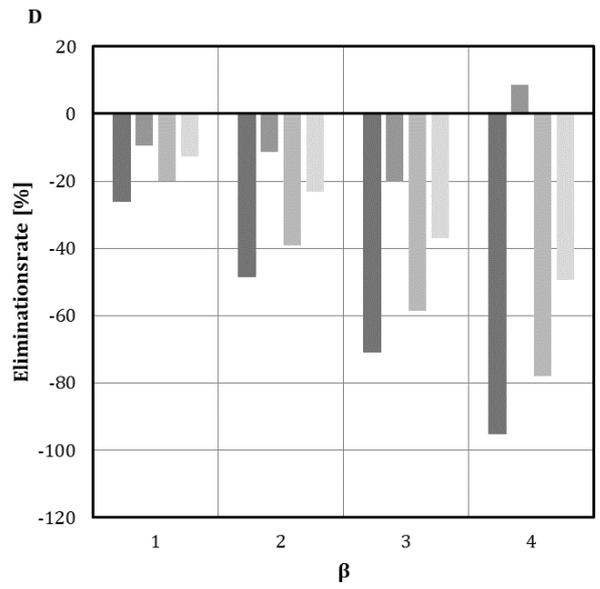
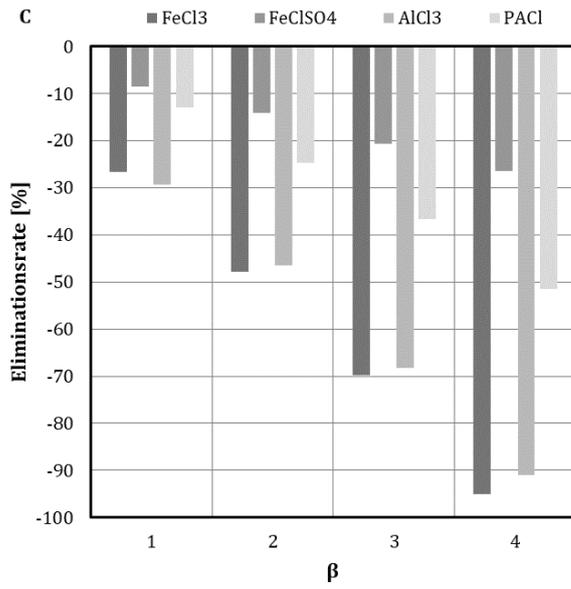
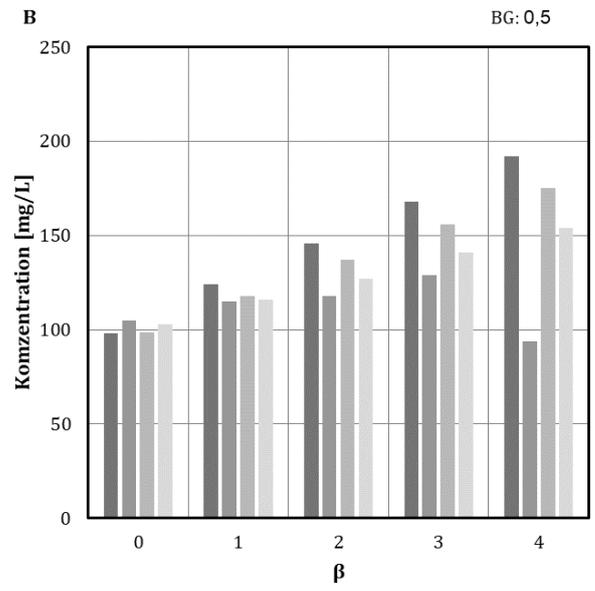
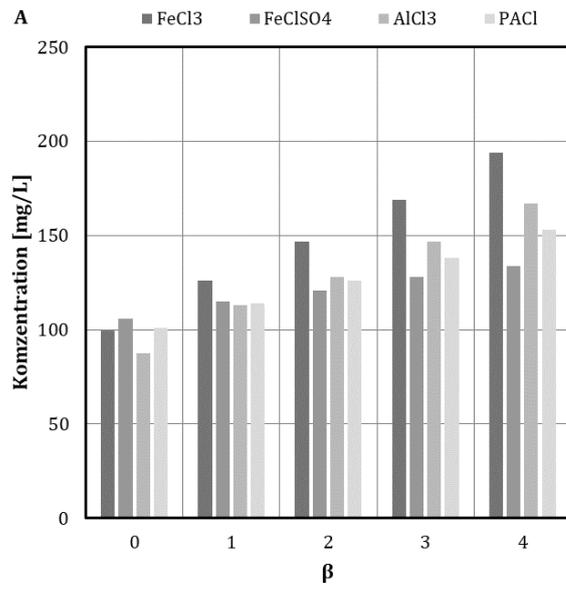
Eisen-ges.



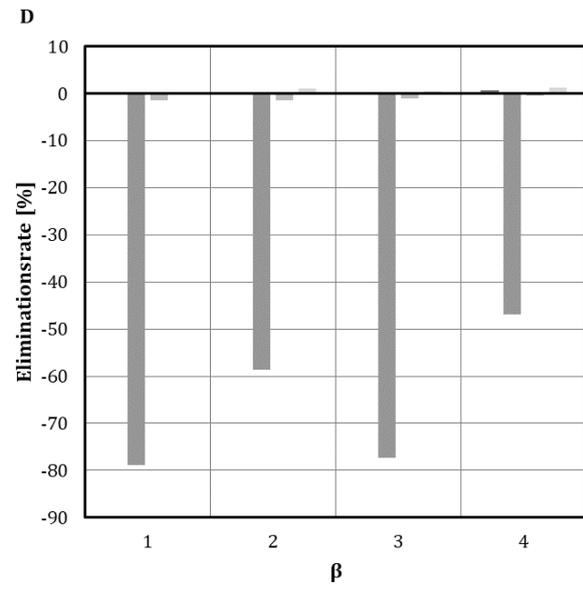
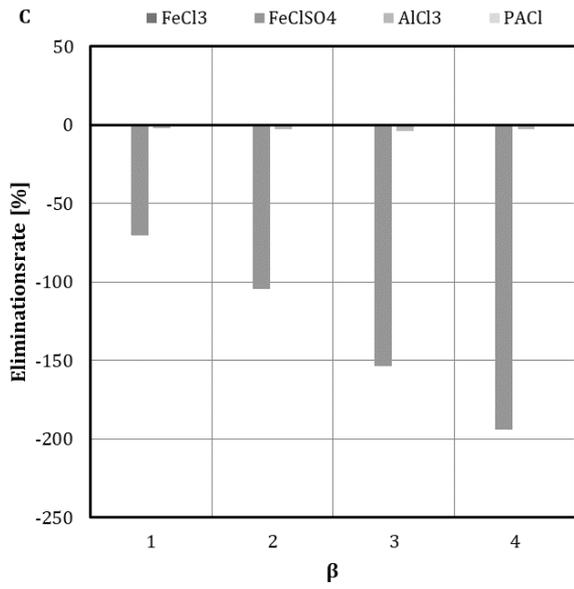
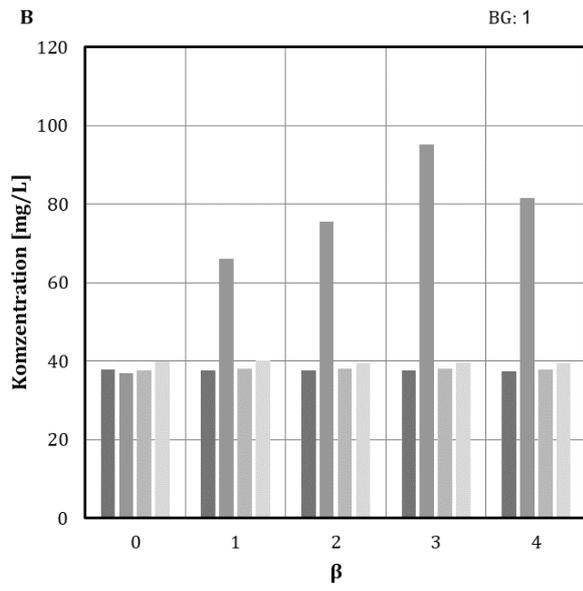
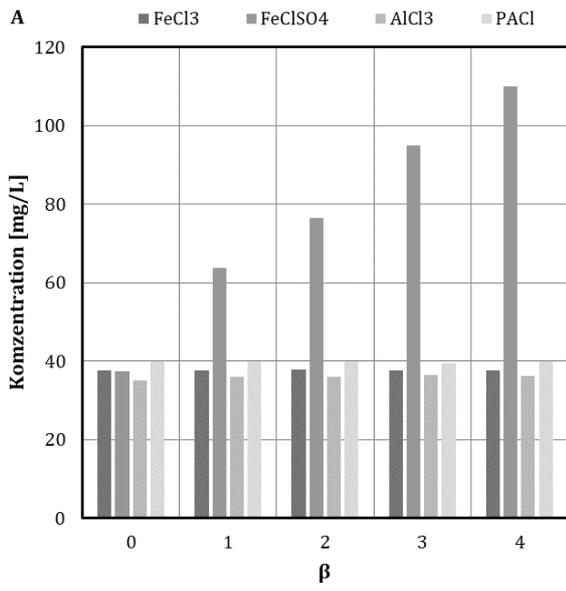
Aluminium-ges.



Chlorid



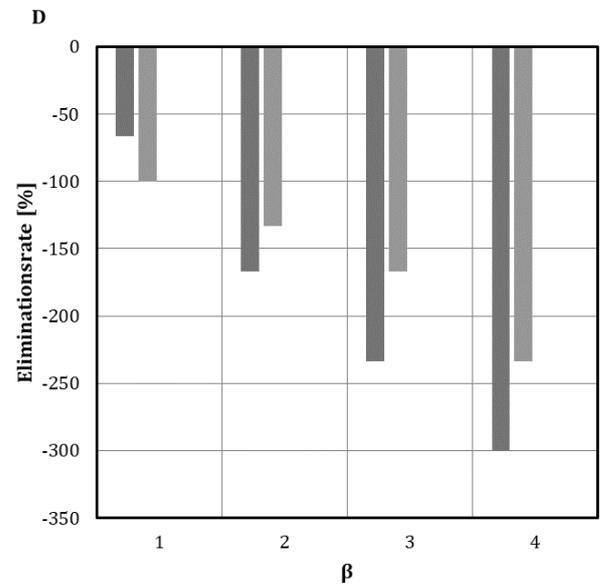
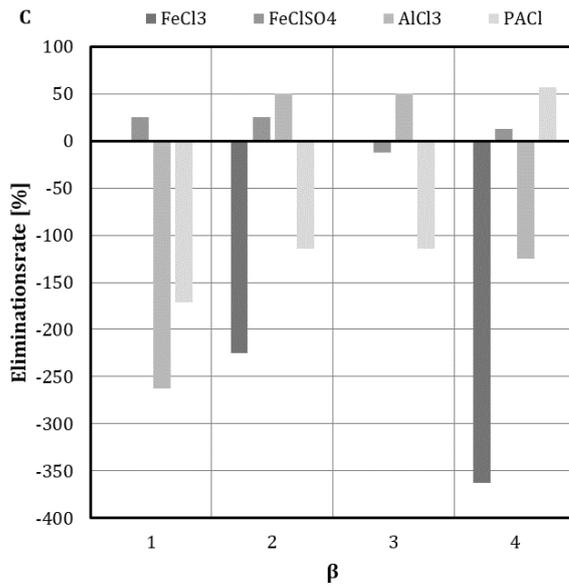
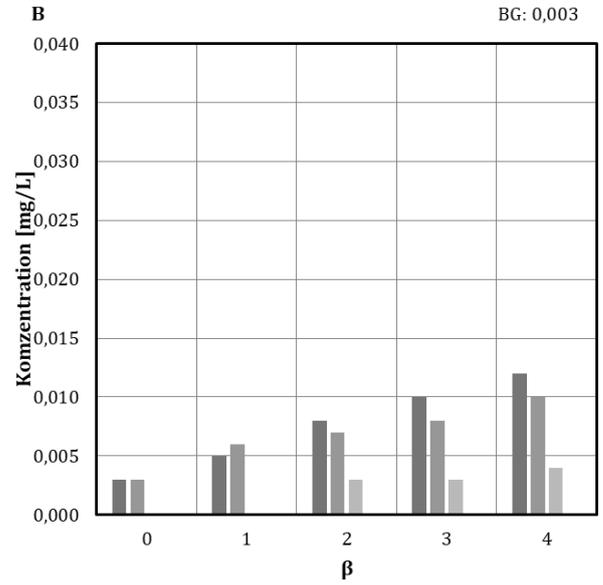
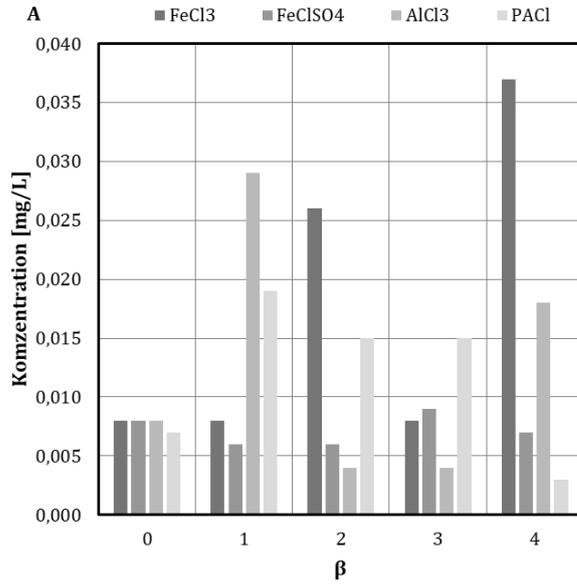
Sulfat



## 2.4 Spurenstoffe

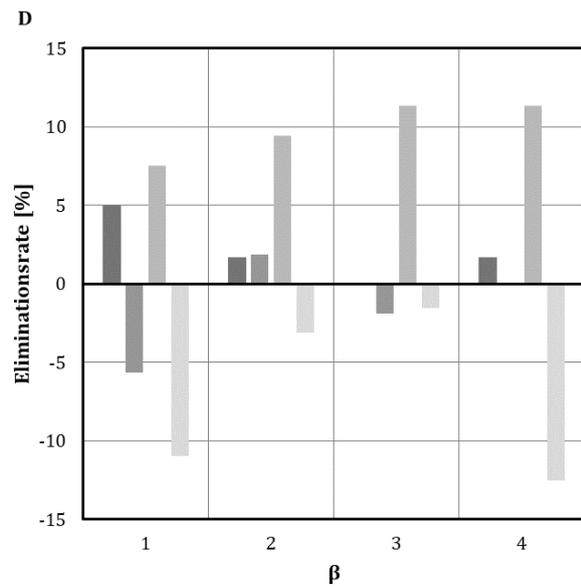
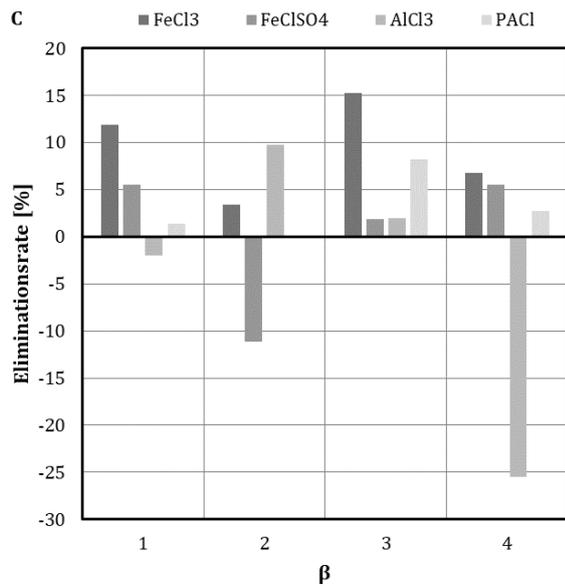
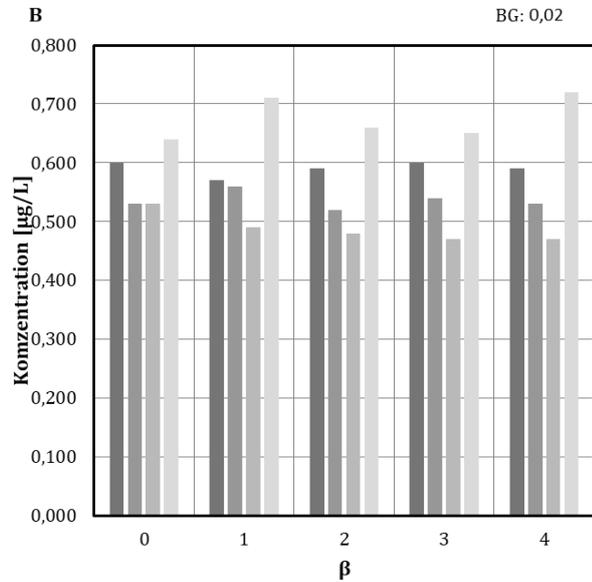
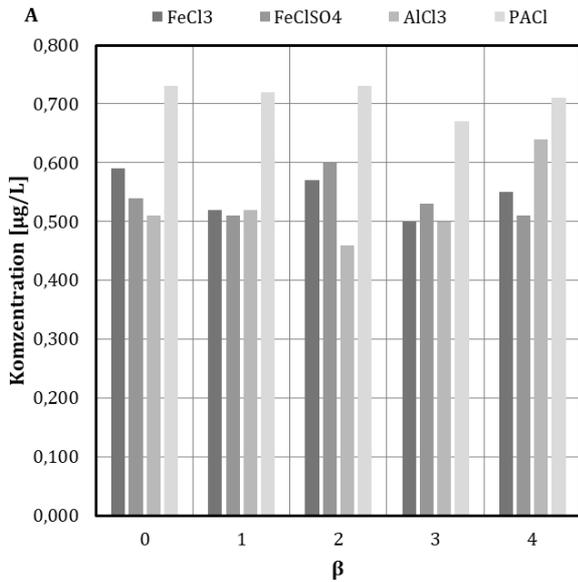
### 2.4.1 Schwermetalle

Nickel

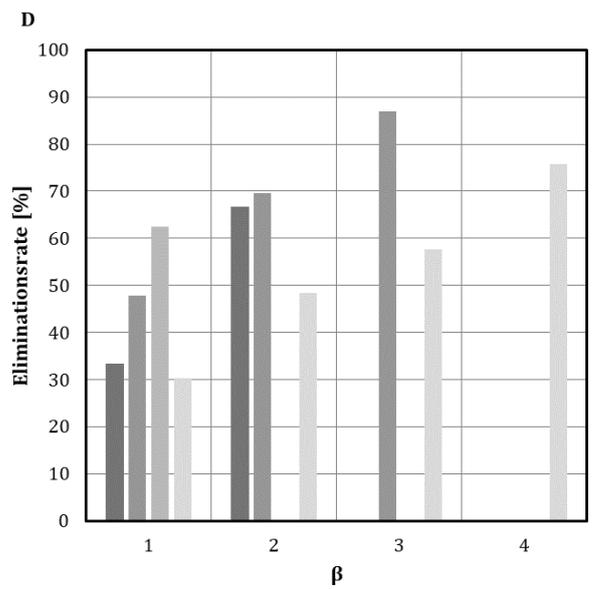
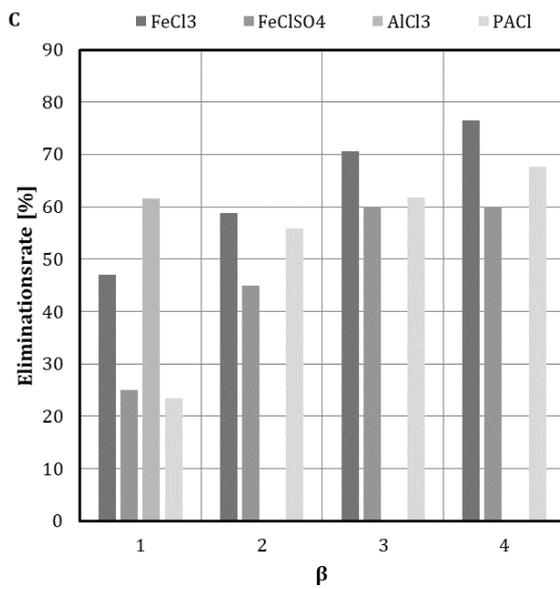
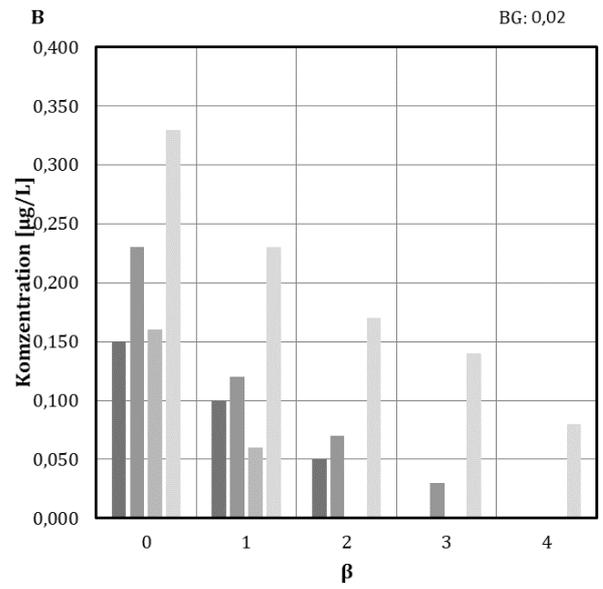
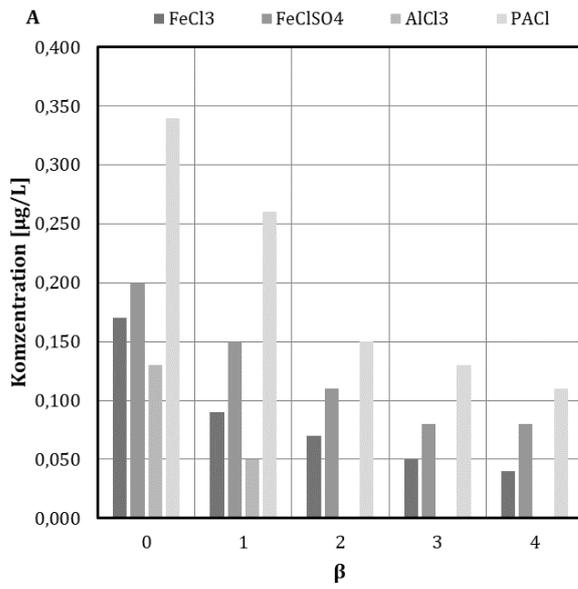


## 2.4.2 Arzneistoffe

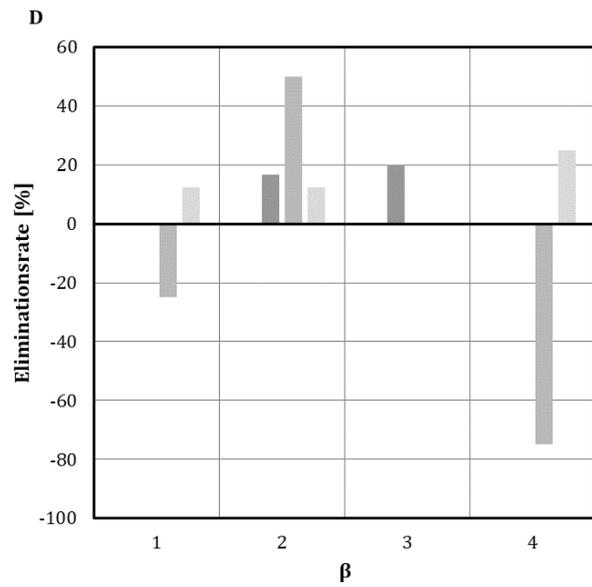
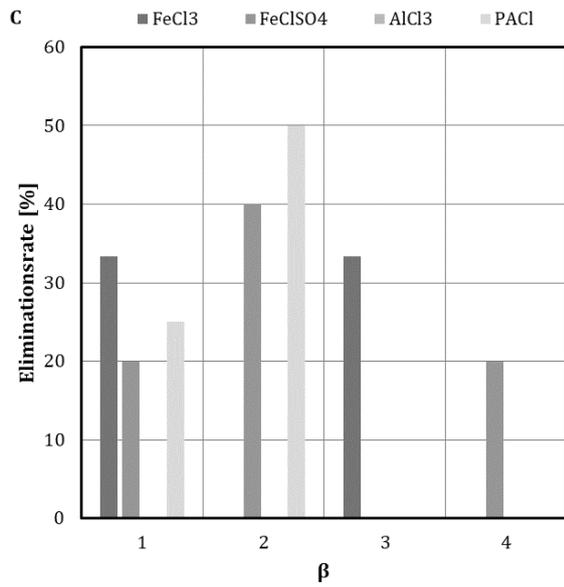
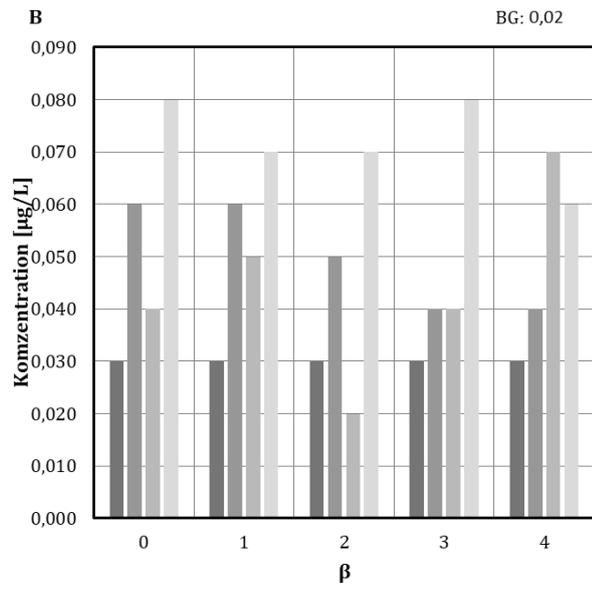
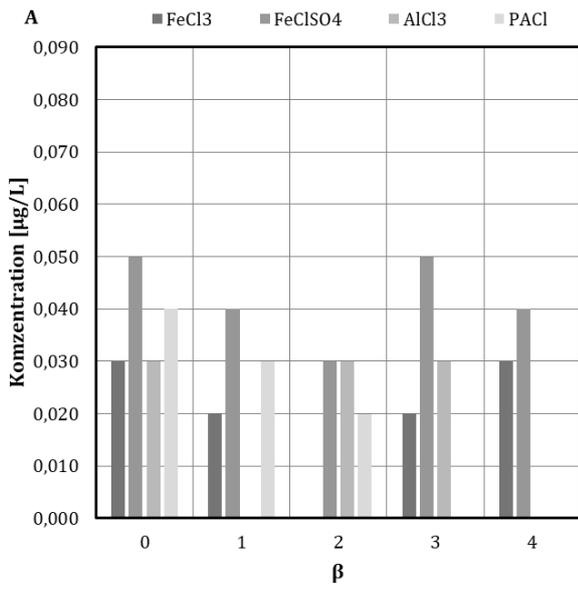
### Carbamazepin



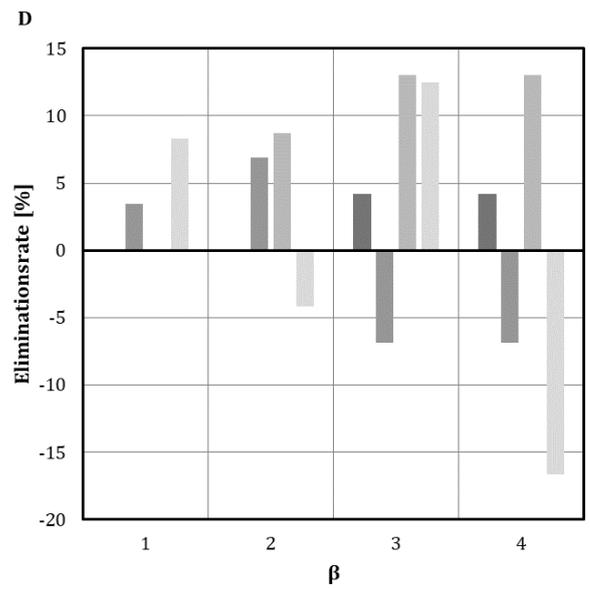
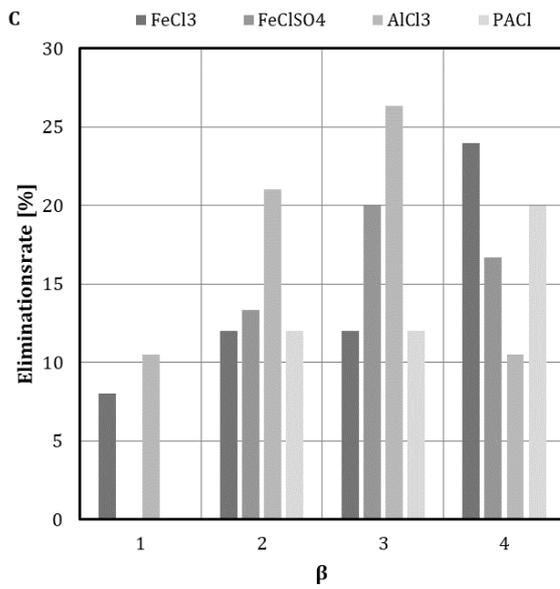
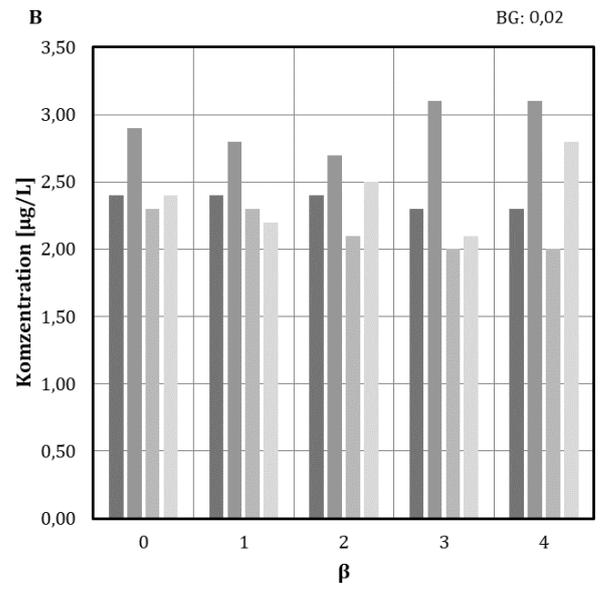
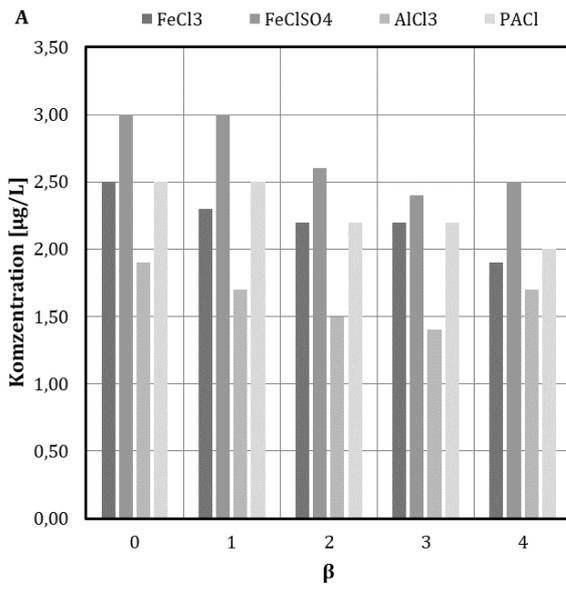
*Ciprofloxacin*



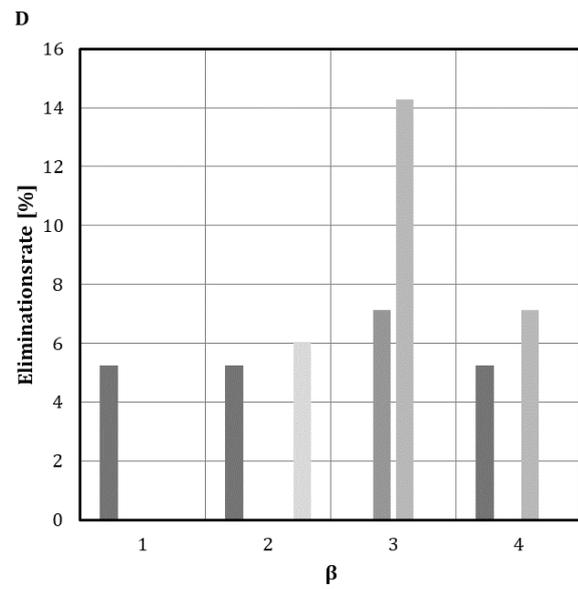
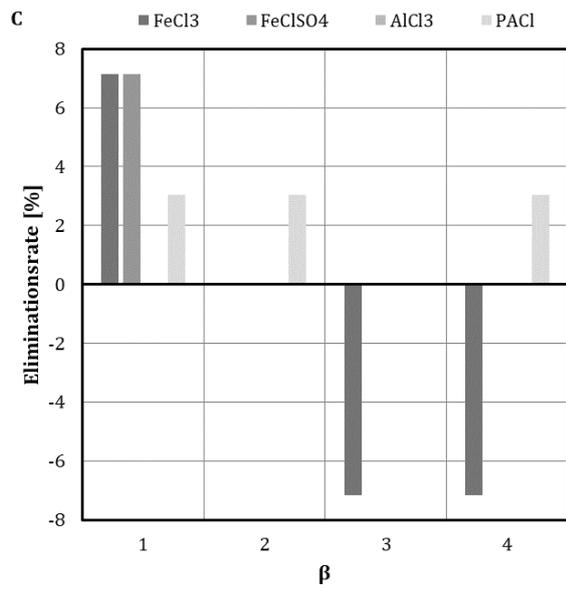
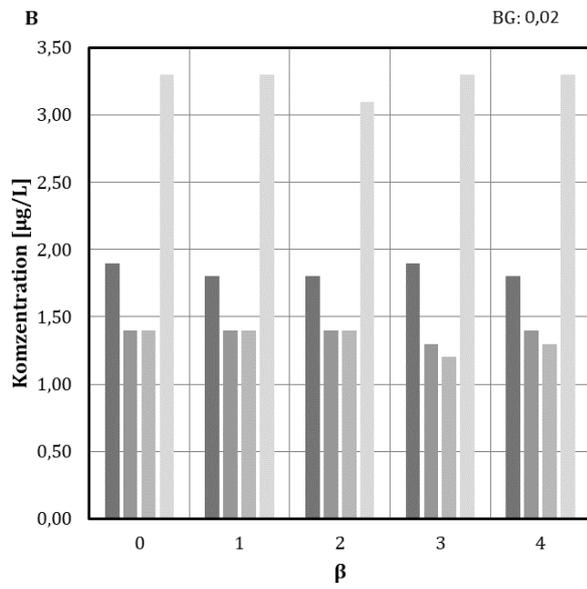
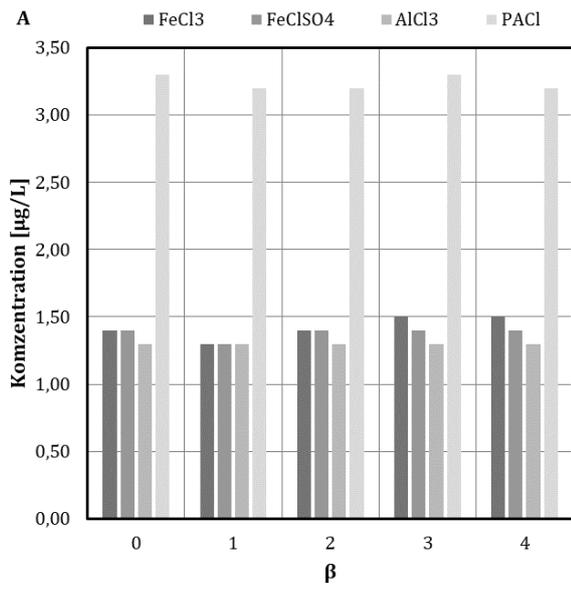
Coffein



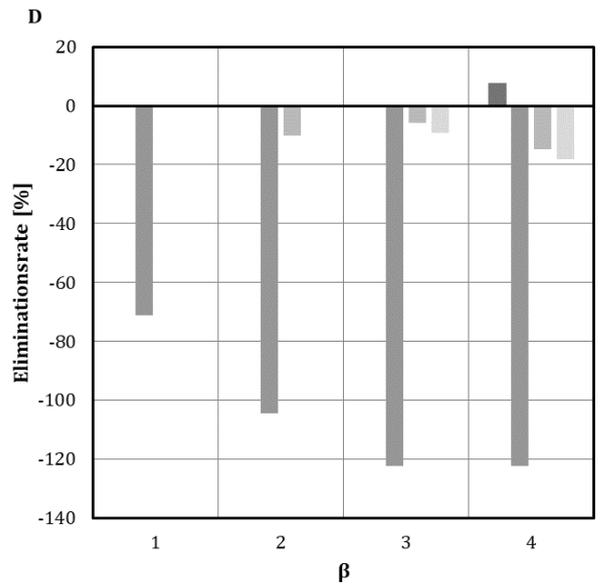
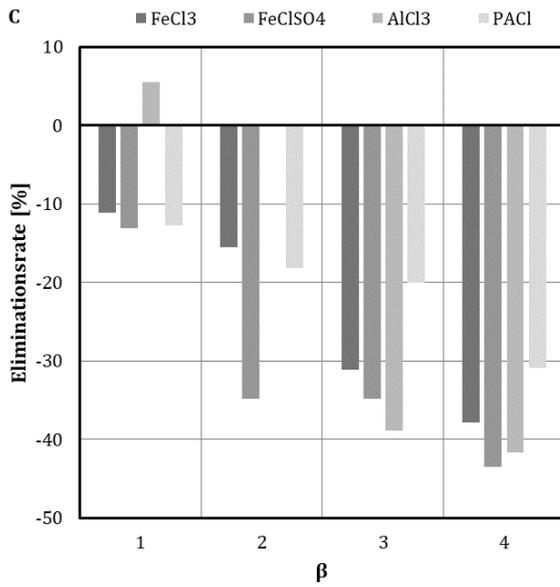
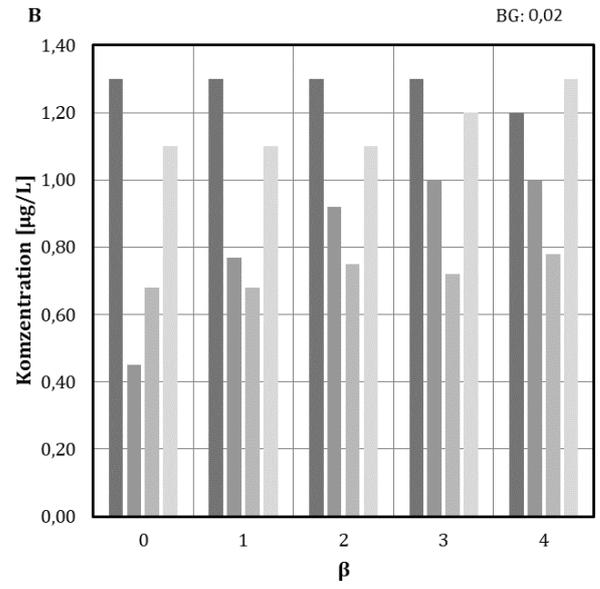
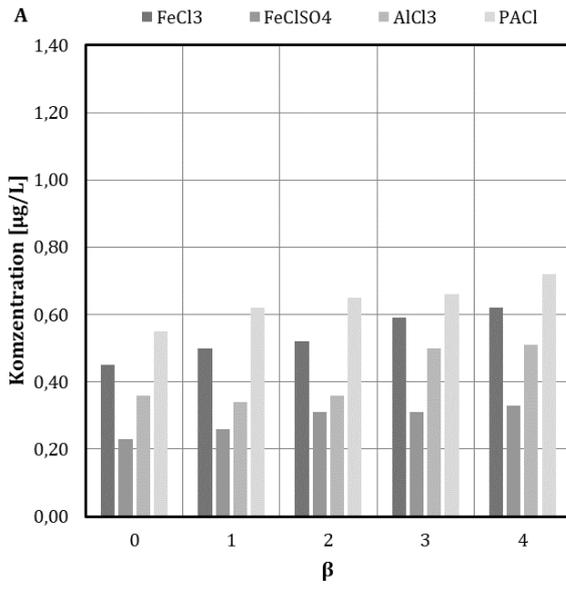
Diclofenac



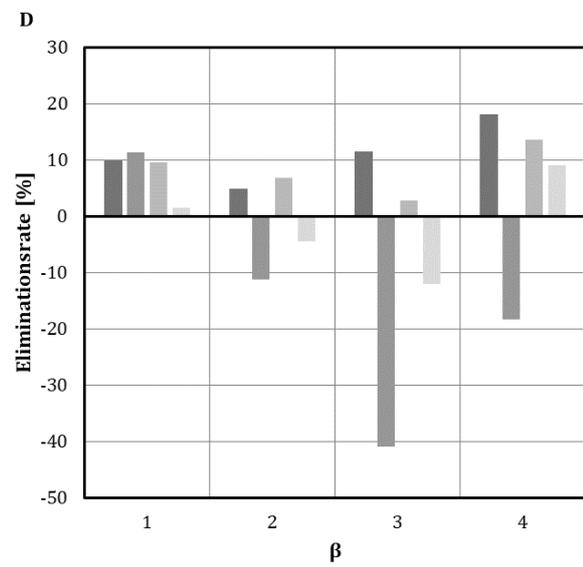
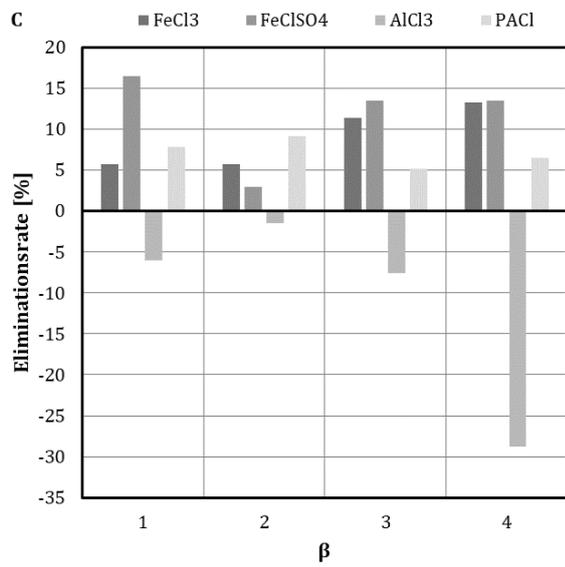
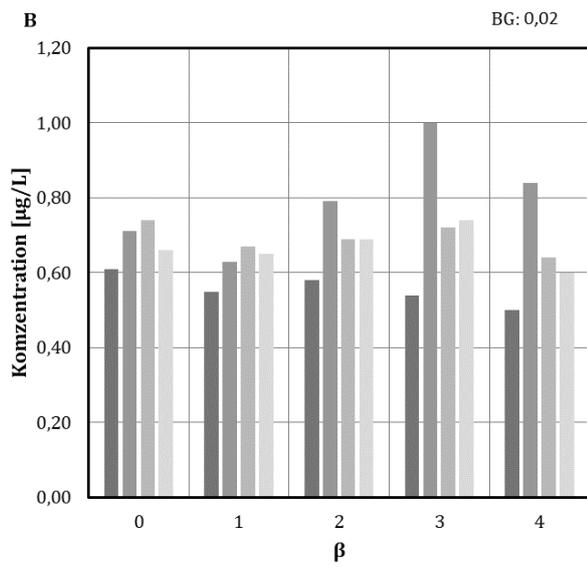
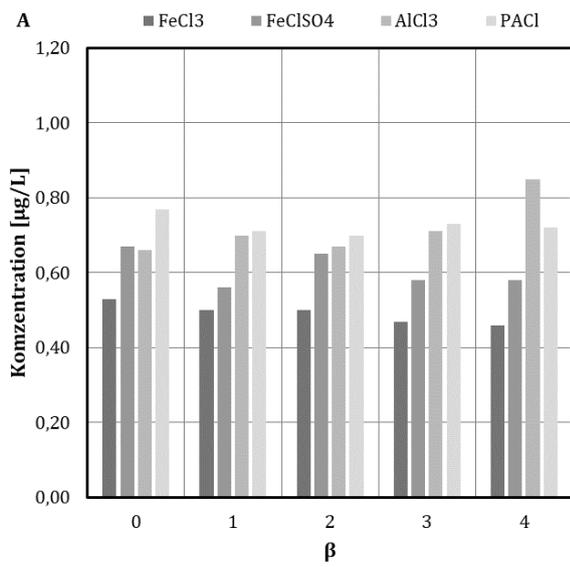
*Gabapentin*



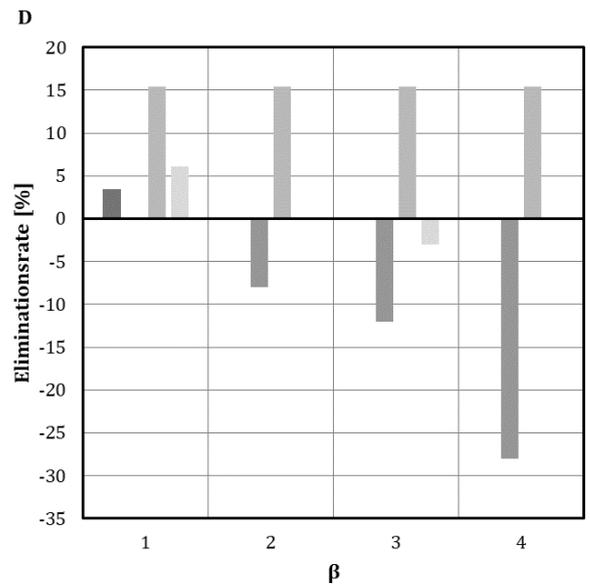
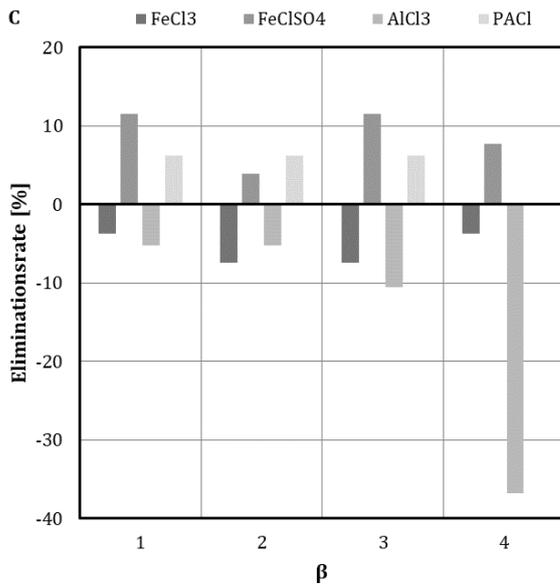
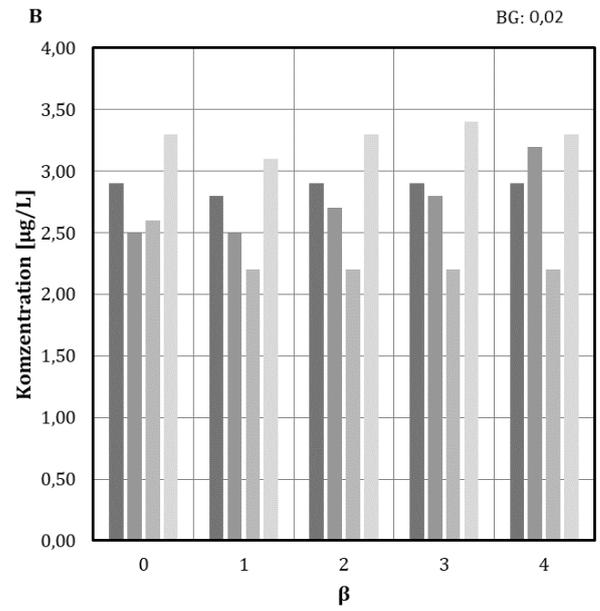
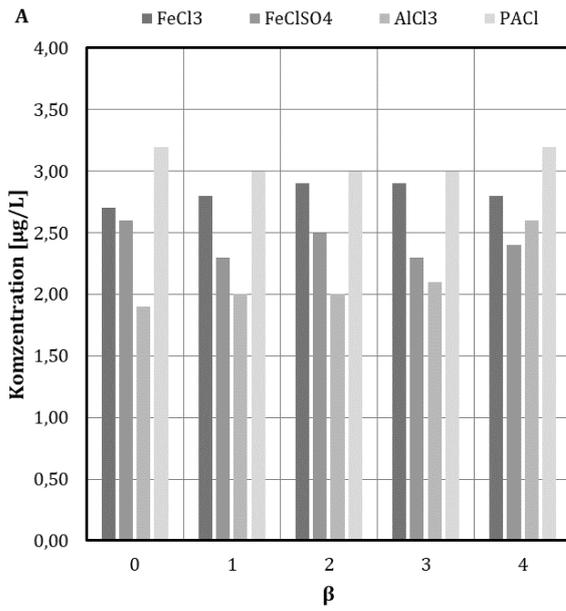
Metformin



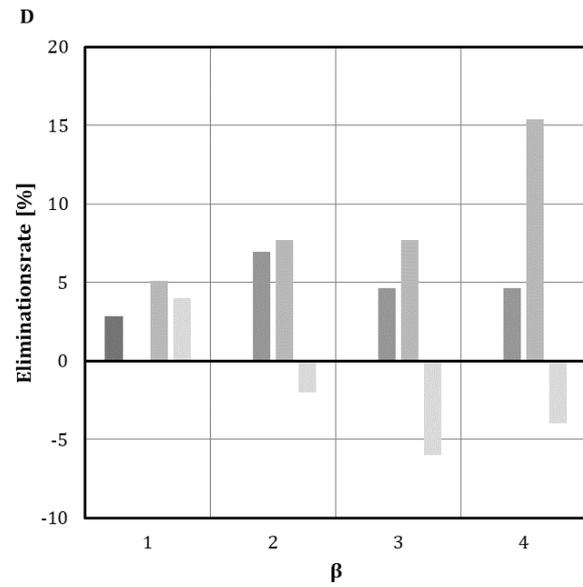
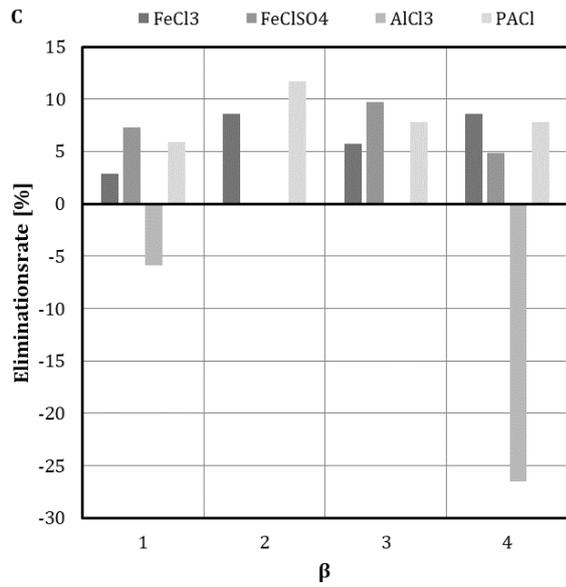
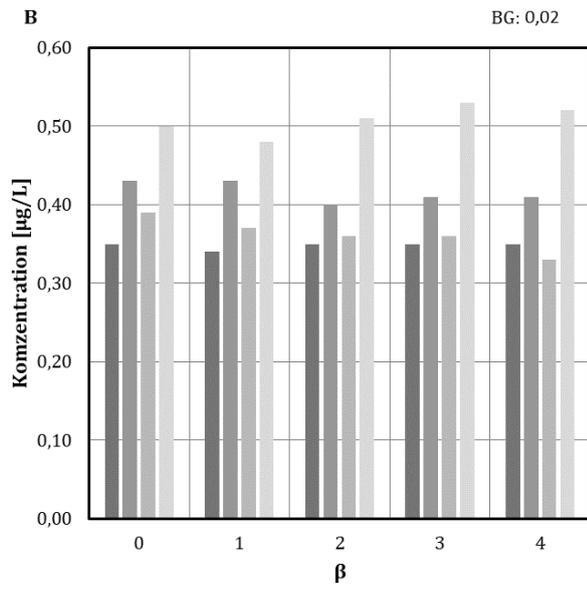
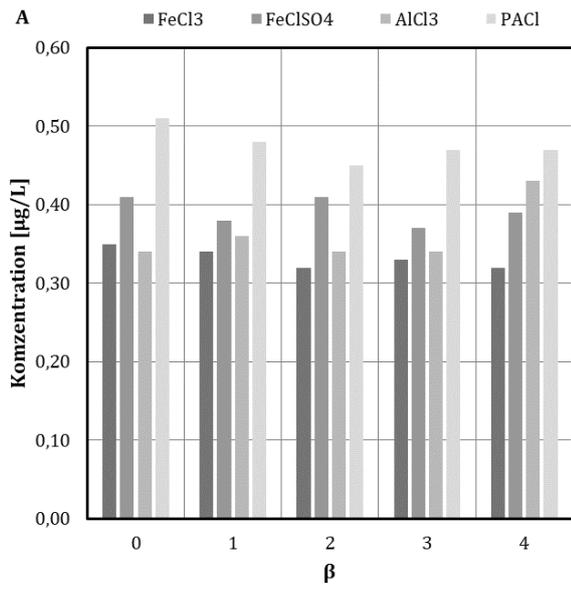
*Sulfamethoxazol*



Metoprolol

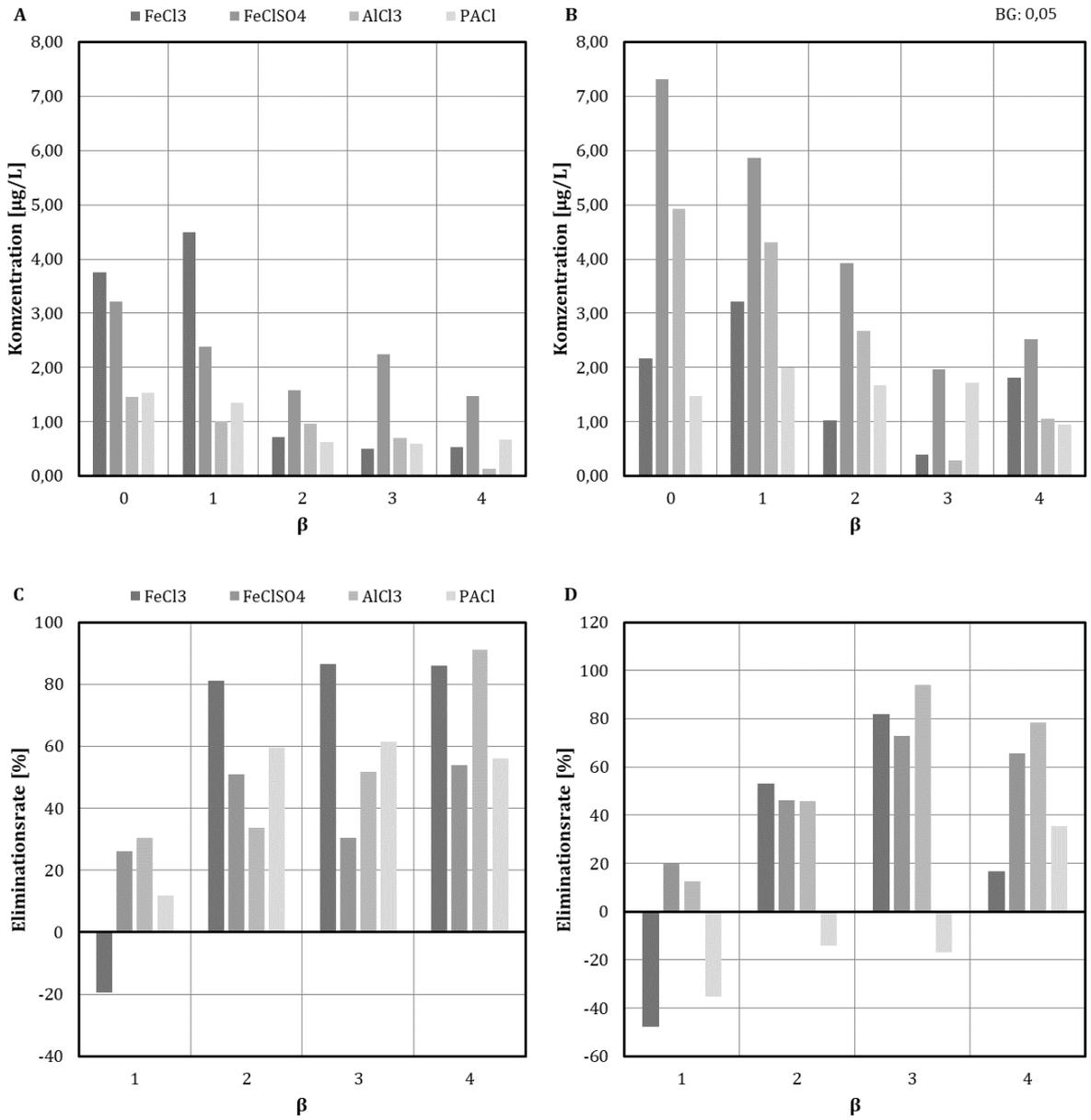


*Trimethoprim*



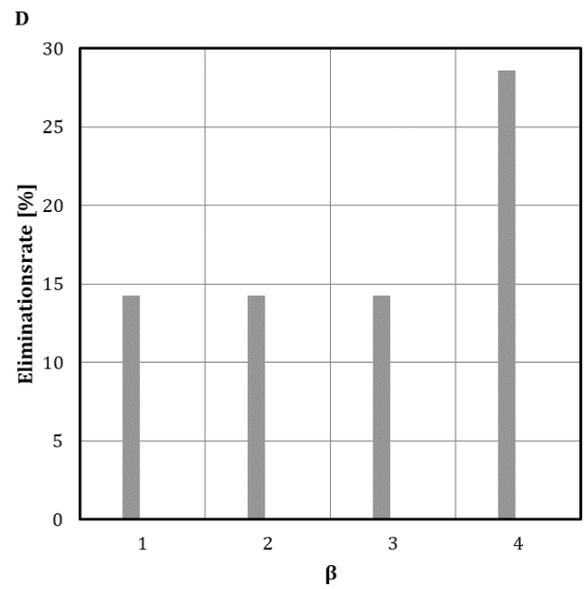
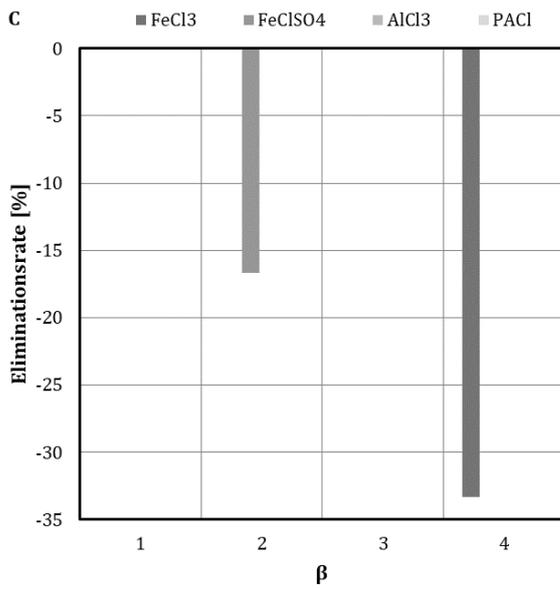
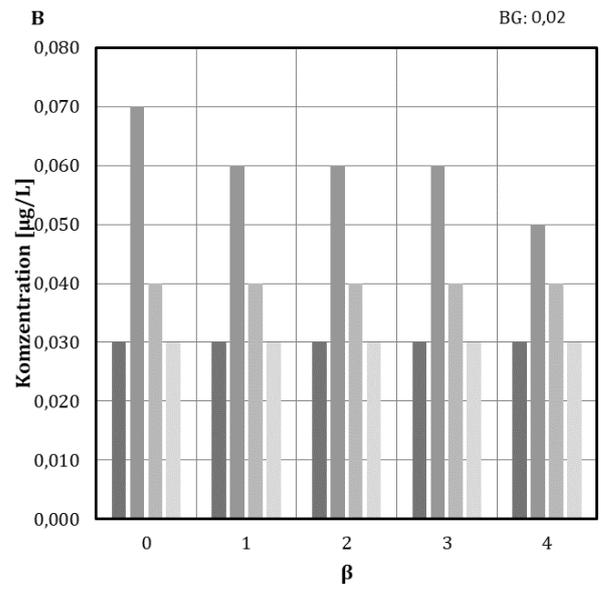
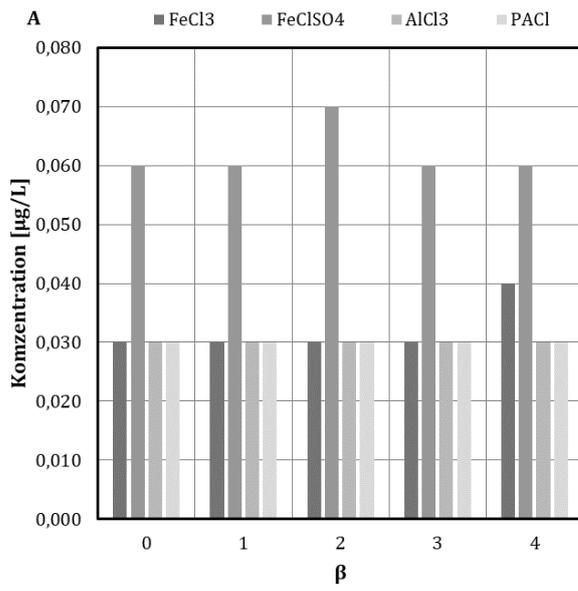
### 2.4.3 Pflanzenschutzmittel

#### Glyphosat

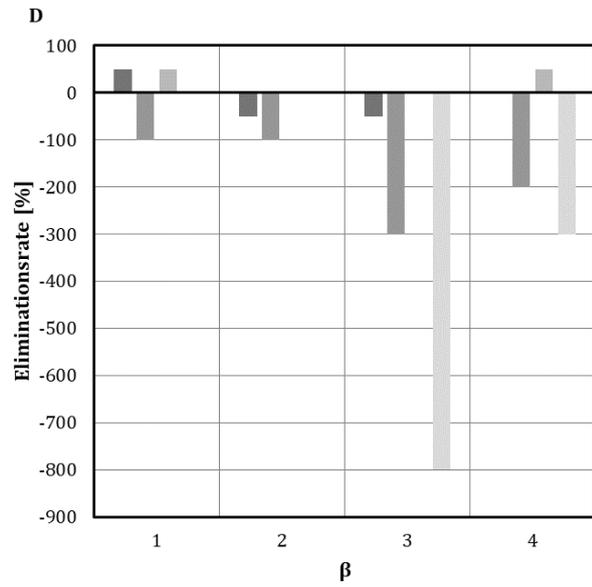
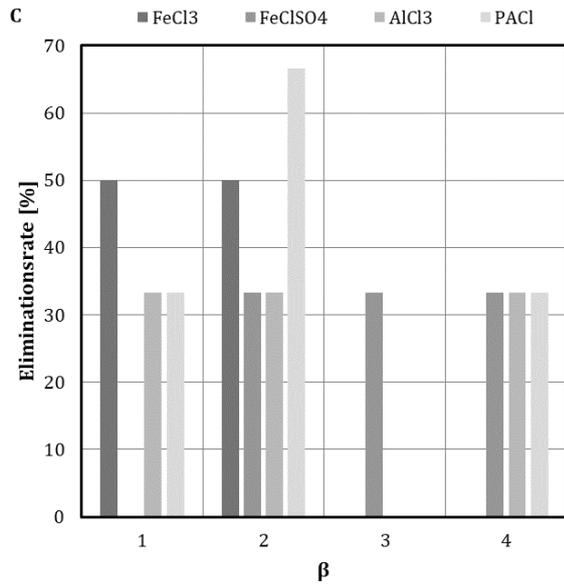
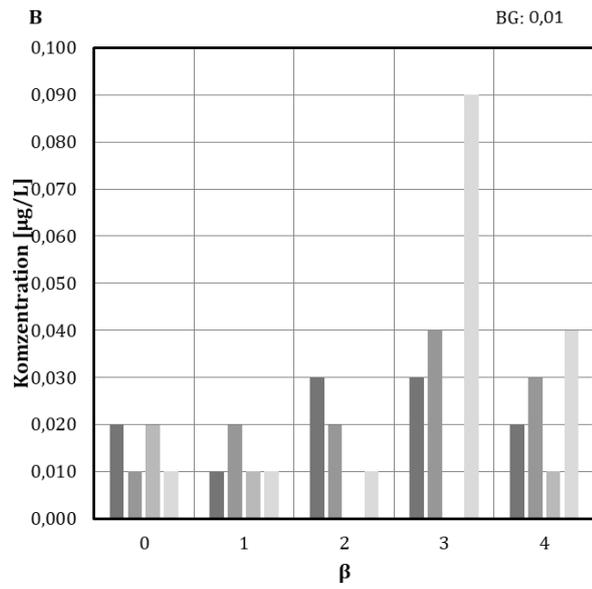
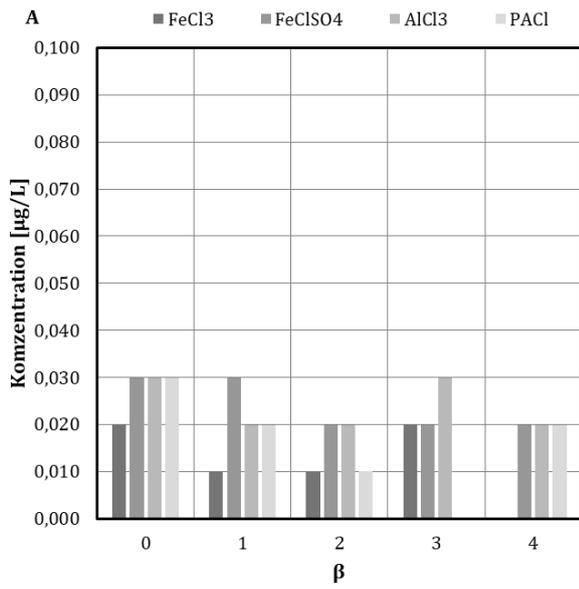




*Imidacloprid*

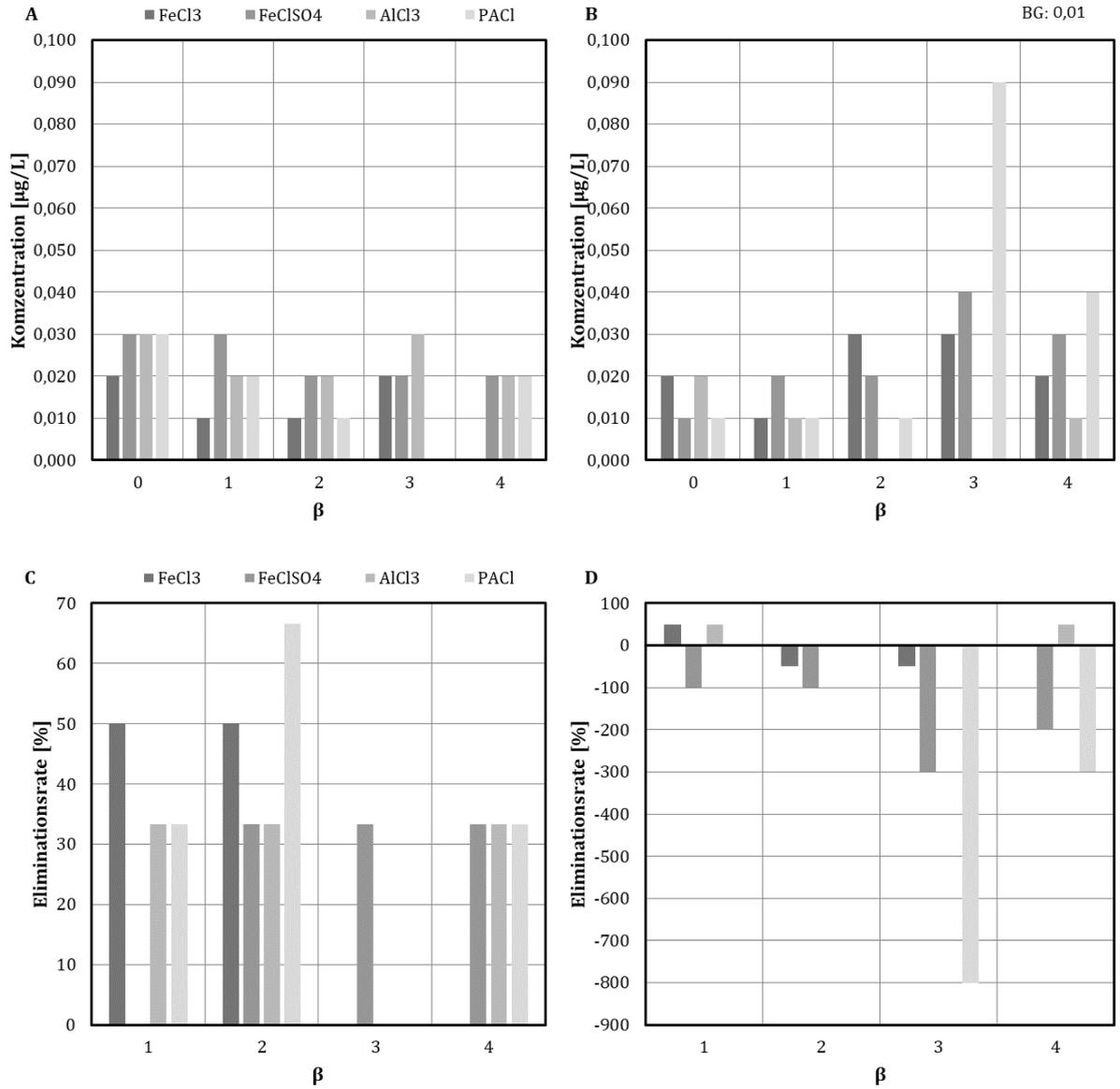


*Naphthalin*

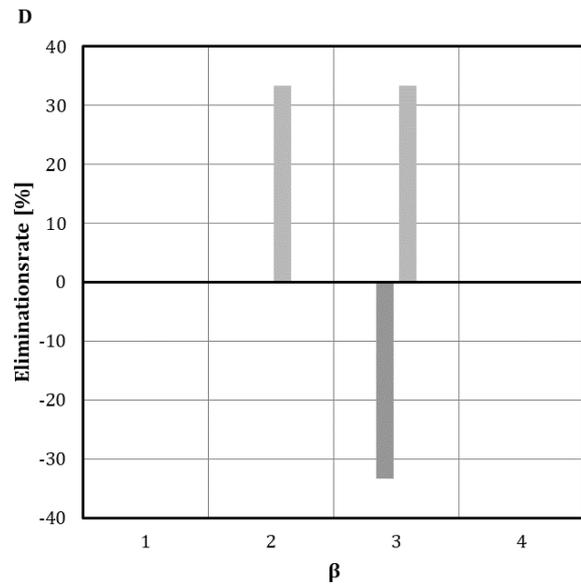
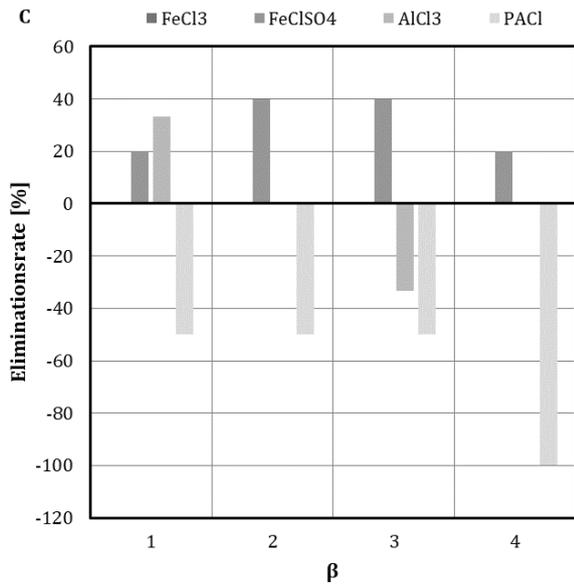
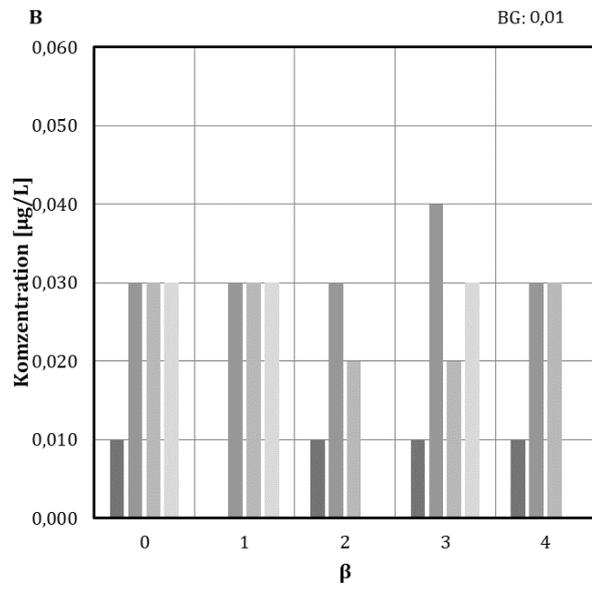
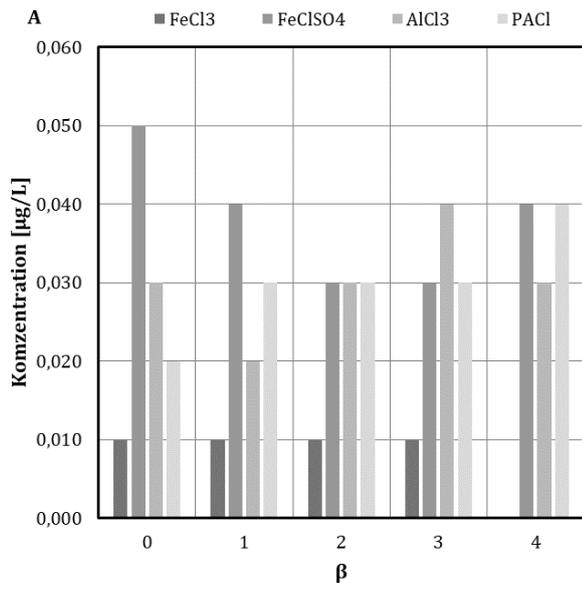


### 2.4.4 PAKs

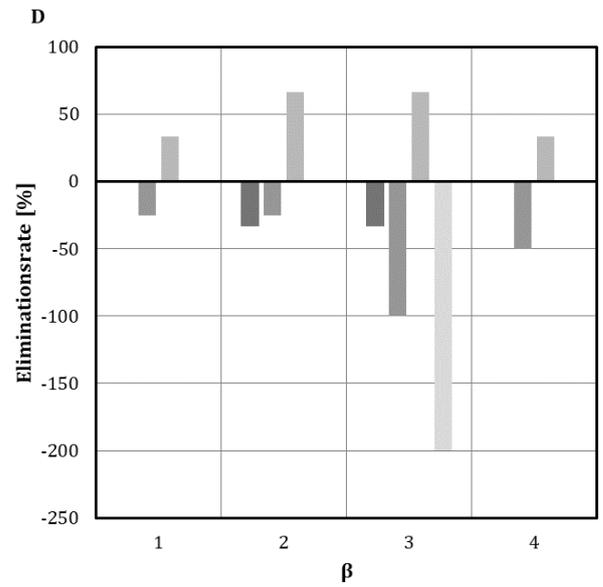
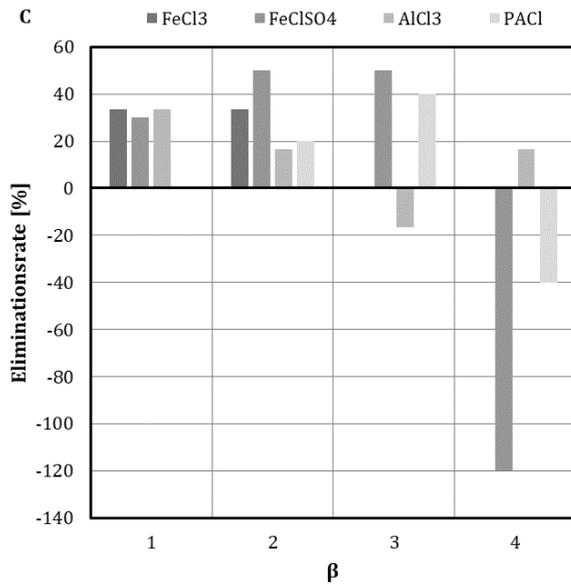
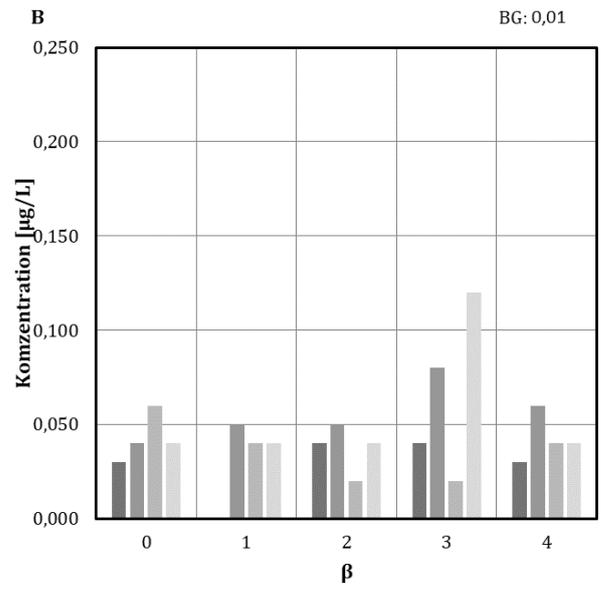
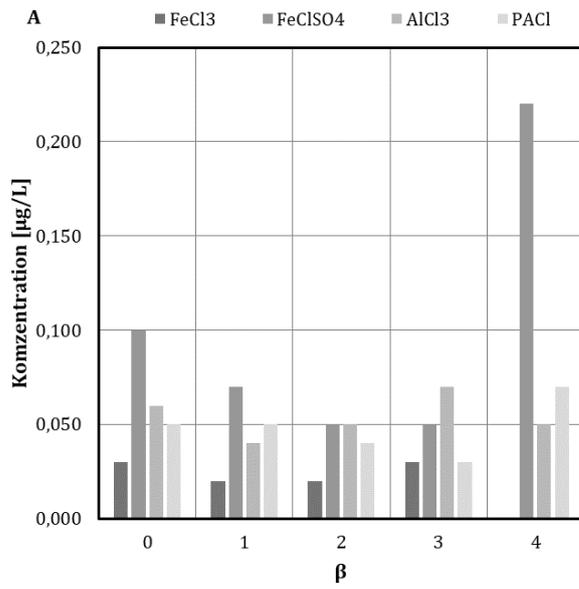
#### Naphthalin



Phenanthren

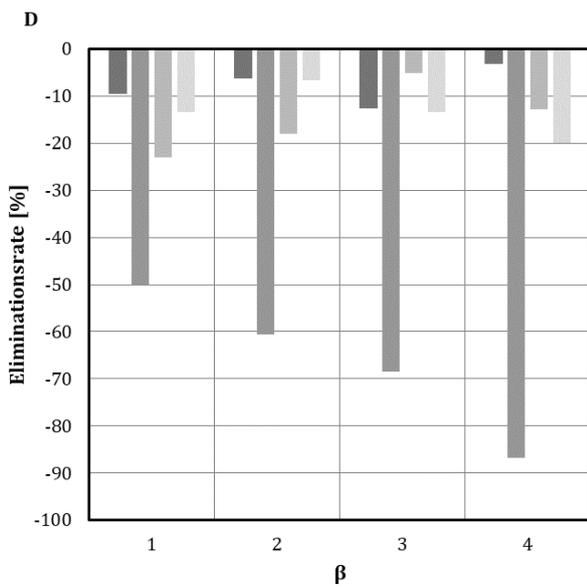
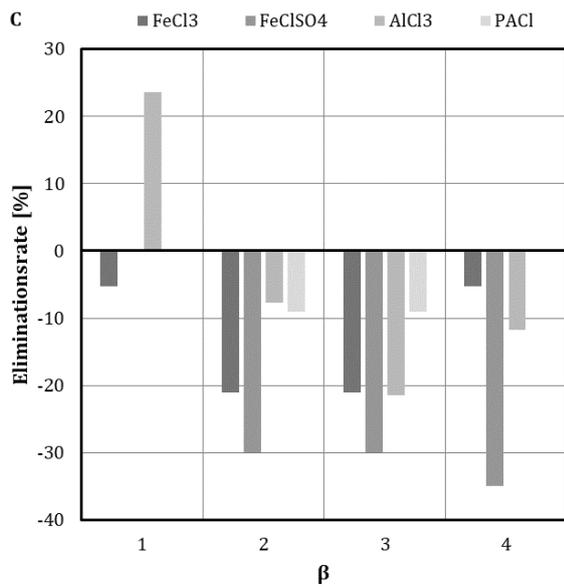
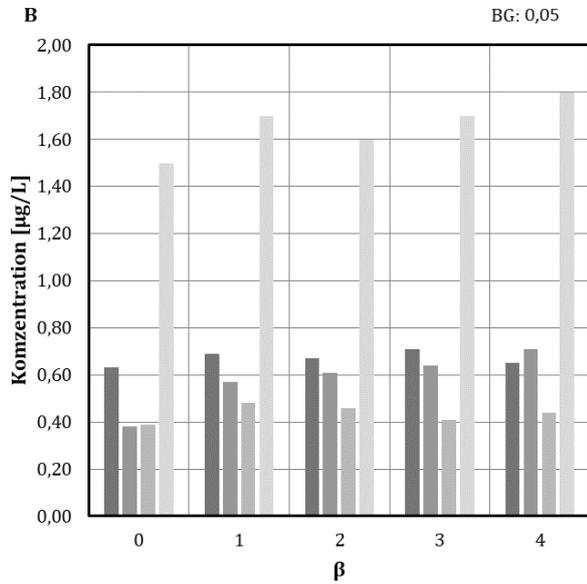
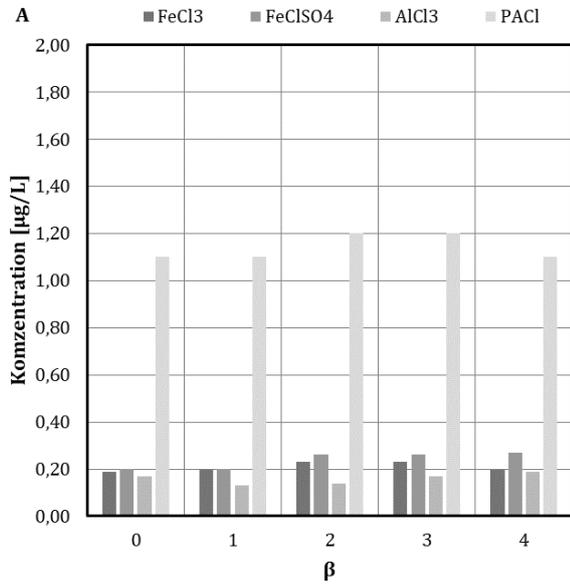


$\Sigma$  PAK's (EPA)

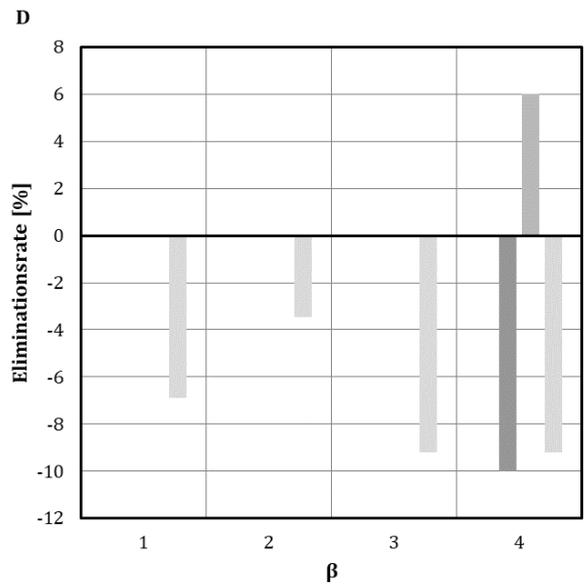
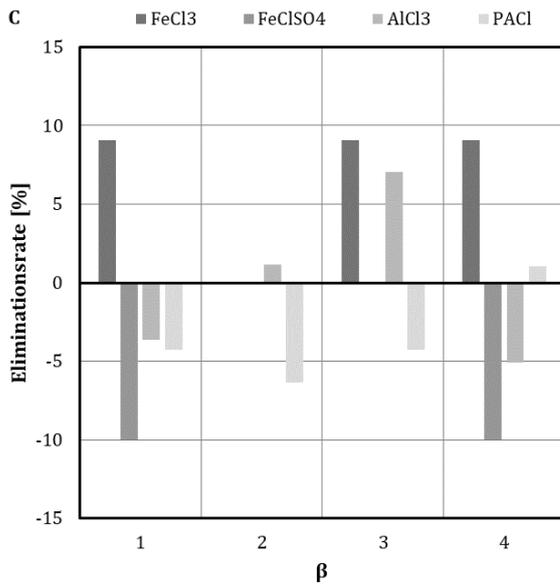
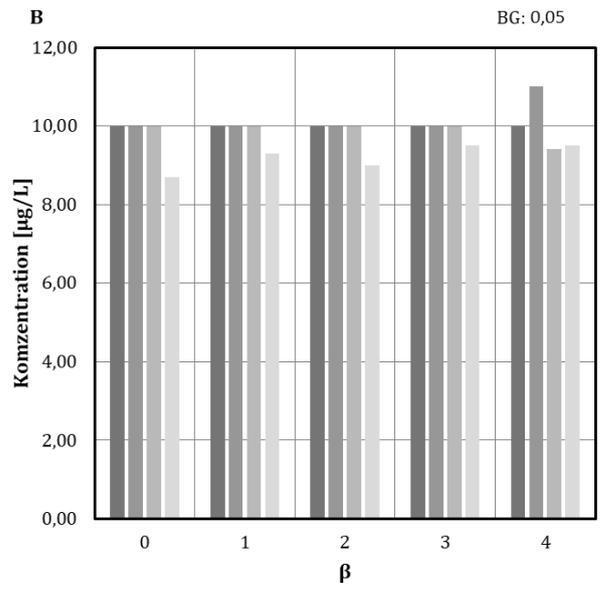
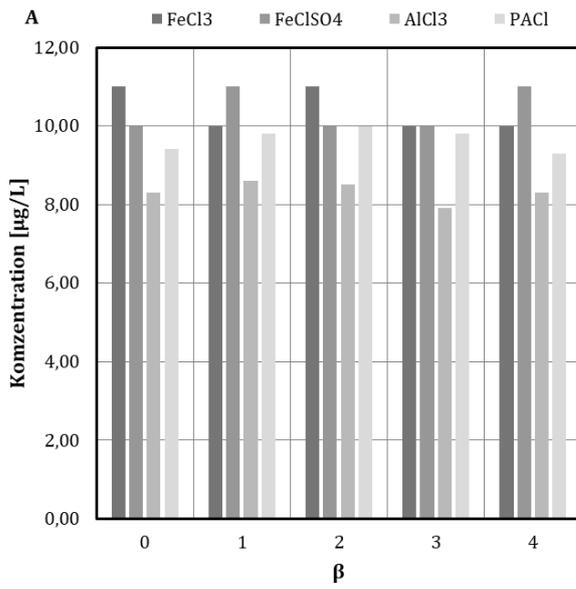


### 2.4.5 Sonstige

#### Acesulfam-K



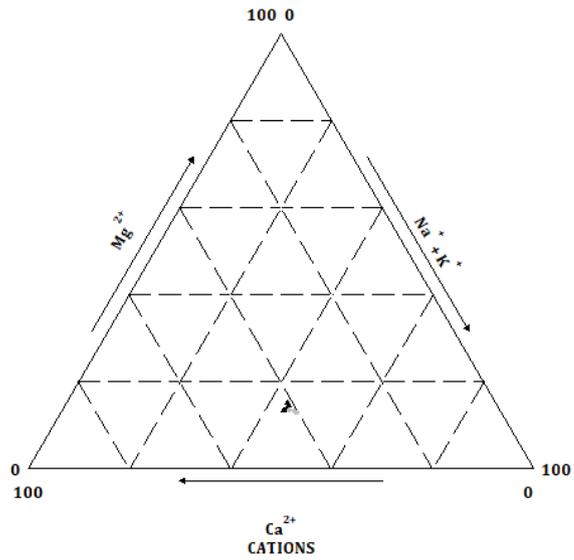
*Benzotriazol*



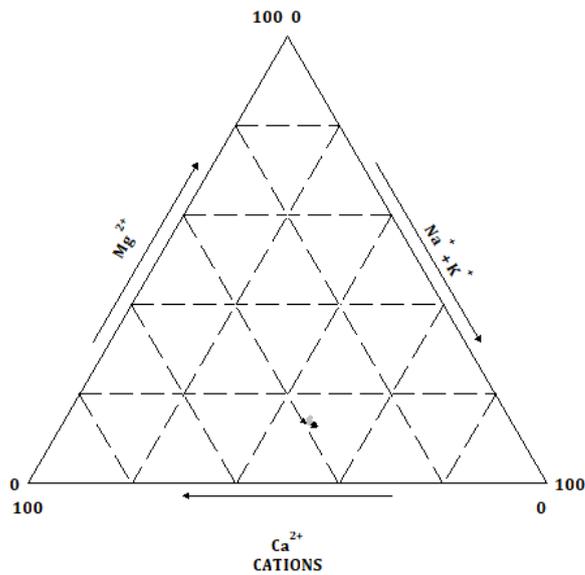
### 3 Ionenverteilung bei Fällversuchen

Anmerkung: Belegung Symbol Dreieck, Farbe schwarz  
Ablauf Symbol Kreis, Farbe grau

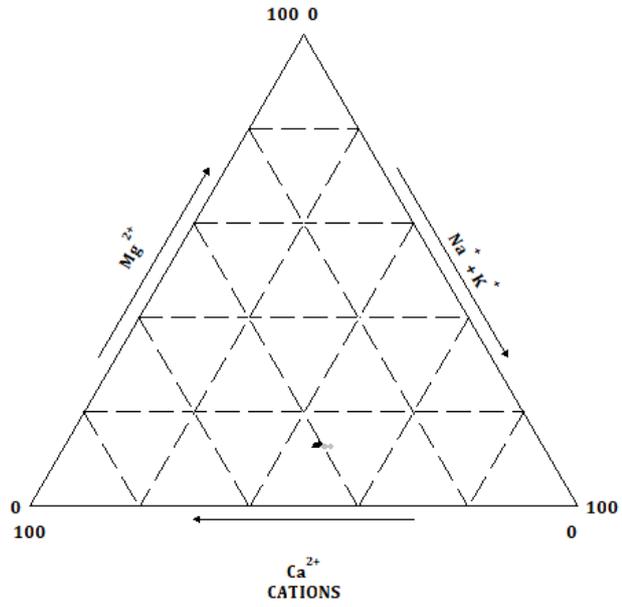
Fällmittel  $FeCl_3$



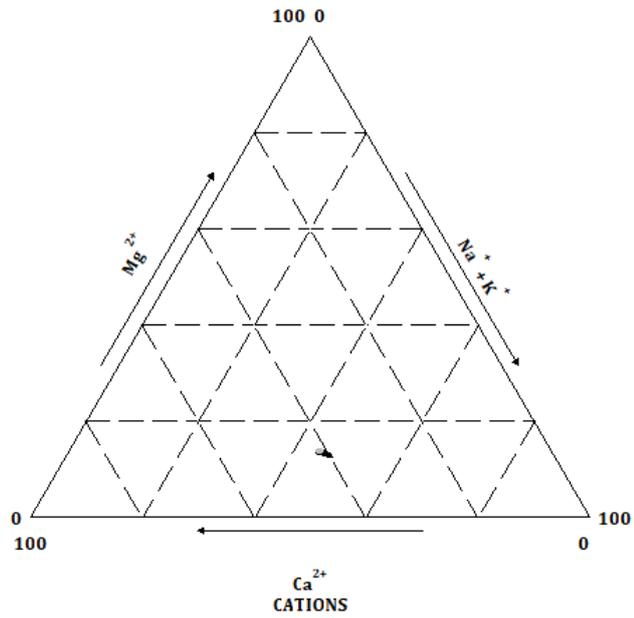
Fällmittel  $FeClSO_4$



Fällmittel  $AlCl_3$



Fällmittel  $PACl$





## Anhang 2 – Ergebnisse der Co-Substrat-Gabe

1	Analysergebnisse .....	142
2	Grafische Darstellung .....	148
2.1	Nähr- und Zehrstoffe.....	148
2.2	Begleitparameter .....	152
2.3	Hauptionen.....	155
2.4	Spurenstoffe.....	159
2.4.1	Schwermetalle.....	159
2.4.2	Arzneistoffe .....	159
2.4.3	Pflanzenschutzmittel.....	164
2.4.4	PAKs .....	165
2.4.5	Sonstige.....	166
2.5	Ionenverteilung.....	167

# 1 Analysergebnisse

		BEGLEITPARAMETER								
		pH	LF	Redox	O <sub>2</sub>	T	TS	SV	ISV	
Typ	ID-ges	[-]	[ $\mu$ S/cm]	[mV]	[mg/l]	°C	g/l	mL/L	mL/g	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	7,38	1080	272,0	3,38	12,5	2,83	920	325,1
		CS-1-2-191121	7,35	1082	234,0	2,60	12,7	2,83	930	328,6
		CS-1-3-191121	7,41	1091	219,0	3,33	12,8	2,52	920	364,5
		CS-1-4-191121	7,40	1095	216,0	3,39	12,9	2,65	910	343,0
		CS-1-5-191121	7,40	1086	214,0	3,29	12,9	2,43	910	375,3
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	7,27	1082	140,5	0,18	13,9	2,84	n.d.	n.d.
		CS-2-2-191126	7,25	1106	206,0	1,10	13,8	2,86	n.d.	n.d.
		CS-2-3-191126	7,03	1099	146,1	0,19	13,9	2,91	n.d.	n.d.
		CS-2-4-191126	7,00	1098	123,7	0,19	14,1	2,86	n.d.	n.d.
		CS-2-5-191126	6,97	1106	158,7	1,85	14,1	2,76	n.d.	n.d.

		BEGLEITPARAMETER							
		CSB	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P	Ortho-P	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	63,3	19,4	1,74	0,38	9,49	5,53	4,59
		CS-1-2-191121	90,2	20,5	1,72	0,18	9,17	5,25	4,33
		CS-1-3-191121	120,0	20,8	1,70	0,19	9,34	5,18	4,39
		CS-1-4-191121	163,0	19,8	1,74	0,19	9,47	4,98	4,38
		CS-1-5-191121	216,0	20,0	1,68	0,19	9,48	4,93	4,39
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	61,8	13,2	5,30	0,51	2,52	5,14	4,67
		CS-2-2-191126	69,7	12,4	5,14	0,42	1,88	5,02	4,52
		CS-2-3-191126	79,7	10,1	5,19	0,04	0,45	5,34	4,69
		CS-2-4-191126	120,0	12,0	5,51	0,42	1,83	5,20	4,65
		CS-2-5-191126	125,0	12,2	3,98	n.d.	2,02	5,36	4,61

		HAUPTIONEN								
		Natrium	Kalium	Calcium	Magnesium	Eisen, ges	Aluminium, ges	Chlorid	Sulfat	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	110,0	22,4	91,0	15,9	0,1	0,1	103,0	37,5
		CS-1-2-191121	111,0	21,6	93,2	15,7	0,2	0,1	103,0	37,5
		CS-1-3-191121	111,0	21,0	97,2	15,8	0,1	0,1	103,0	37,5
		CS-1-4-191121	106,0	20,0	99,4	15,7	0,1	0,0	103,0	37,7
		CS-1-5-191121	101,0	19,8	99,0	15,7	0,1	0,0	103,0	41,4
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	103,0	24,5	83,1	15,4	0,0	0,2	107,0	39,4
		CS-2-2-191126	101,0	24,5	80,2	15,1	0,2	0,1	106,0	39,3
		CS-2-3-191126	105,0	24,1	85,3	15,8	0,2	0,1	107,0	39,3
		CS-2-4-191126	109,0	25,3	88,2	16,5	0,2	0,1	107,0	39,6
		CS-2-5-191126	108,0	24,8	87,2	16,2	0,2	0,1	107,0	39,1

		SCHWERMETALLE				
		Blei (Pb)	Cadmium (Cd)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)	
Typ	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	< 0,005	< 0,001	0,008	0,0001
		CS-1-2-191121	< 0,005	< 0,001	0,007	0,0001
		CS-1-3-191121	< 0,005	< 0,001	0,005	0,0001
		CS-1-4-191121	< 0,005	< 0,001	0,005	0,0001
		CS-1-5-191121	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	< 0,005	< 0,001	0,006	0,0001
		CS-2-2-191126	< 0,005	< 0,001	0,005	0,0001
		CS-2-3-191126	< 0,005	< 0,001	0,021	0,0001
		CS-2-4-191126	< 0,005	< 0,001	0,004	0,0001
		CS-2-5-191126	< 0,005	< 0,001	0,003	0,0001

		ARZNEISTOFFE						
		<i>Carbamazepin</i>	<i>Ciprofloxacin</i>	<i>Coffein</i>	<i>Diclofenac</i>	<i>Gabapentin</i>	<i>Ibuprofen</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	0,530	0,360	0,660	2,100	2,200	0,790
		CS-1-2-191121	0,520	0,390	0,610	2,000	2,100	0,670
		CS-1-3-191121	0,570	0,420	0,810	2,100	2,200	0,680
		CS-1-4-191121	0,510	0,380	1,100	2,100	2,200	1,100
		CS-1-5-191121	0,530	0,390	1,500	2,000	2,200	1,300
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	0,620	0,330	0,090	2,200	3,000	< 0,05
		CS-2-2-191126	0,670	0,340	0,290	2,100	3,100	< 0,05
		CS-2-3-191126	0,600	0,310	0,480	1,900	3,200	0,420
		CS-2-4-191126	0,630	0,330	0,510	2,300	3,200	0,700
		CS-2-5-191126	0,620	0,300	0,570	2,200	3,200	0,680

		ARZNEISTOFFE						
		<i>Iopamidol</i>	<i>Metformin</i>	<i>Metoprolol</i>	<i>Oxytetracyclin</i>	<i>Sulfamethoxazol</i>	<i>Trimethoprim</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	< 0,04	1,300	2,400	< 0,02	0,380	0,410
		CS-1-2-191121	< 0,04	1,200	2,900	< 0,02	0,490	0,400
		CS-1-3-191121	< 0,04	1,600	3,100	< 0,02	0,560	0,420
		CS-1-4-191121	< 0,04	1,900	2,800	< 0,02	0,480	0,380
		CS-1-5-191121	< 0,04	2,100	3,200	< 0,02	0,560	0,420
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	< 0,04	0,290	3,300	< 0,02	0,380	0,330
		CS-2-2-191126	< 0,04	0,760	3,600	< 0,02	0,420	0,350
		CS-2-3-191126	< 0,04	1,100	3,400	< 0,02	0,380	0,320
		CS-2-4-191126	< 0,04	1,000	3,600	< 0,02	0,470	0,340
		CS-2-5-191126	< 0,04	1,200	3,400	< 0,02	0,450	0,310

		PFLANZENSCHUTZMITTEL							
		<i>Aclonifen</i>	<i>Bifenox</i>	<i>Cybutryn (Irgarol)</i>	<i>Cypermethrin</i>	<i>Dichlorvos</i>	<i>Dicofol</i>	<i>Diuron</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-1-2-191121	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-1-3-191121	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-1-4-191121	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-1-5-191121	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-2-2-191126	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-2-3-191126	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-2-4-191126	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		CS-2-5-191126	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02

		PFLANZENSCHUTZMITTEL							
		<i>Glyphosat</i>	<i>Imidacloprid</i>	<i>Isoproturon</i>	<i>Quinoxifen</i>	<i>Terbutylazin</i>	<i>Terbutryn</i>	<i>Triclosan</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	2,480	0,020	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
		CS-1-2-191121	2,220	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,050	< 0,05
		CS-1-3-191121	2,560	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
		CS-1-4-191121	2,520	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,050	< 0,05
		CS-1-5-191121	1,980	0,020	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	3,040	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		CS-2-2-191126	2,100	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		CS-2-3-191126	1,360	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		CS-2-4-191126	1,660	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		CS-2-5-191126	1,120	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05

		PAKs								
		<i>Acenaphthen</i>	<i>Acenaphthylene</i>	<i>Anthracen</i>	<i>Benzo[a]anthracen</i>	<i>Benzo[a]pyren</i>	<i>Benzo[b]fluoranthen</i>	<i>Benzo[ghi]perylene</i>	<i>Benzo[k]fluoranthen</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-1-2-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-1-3-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-1-4-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-1-5-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-2-2-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-2-3-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-2-4-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
		CS-2-5-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

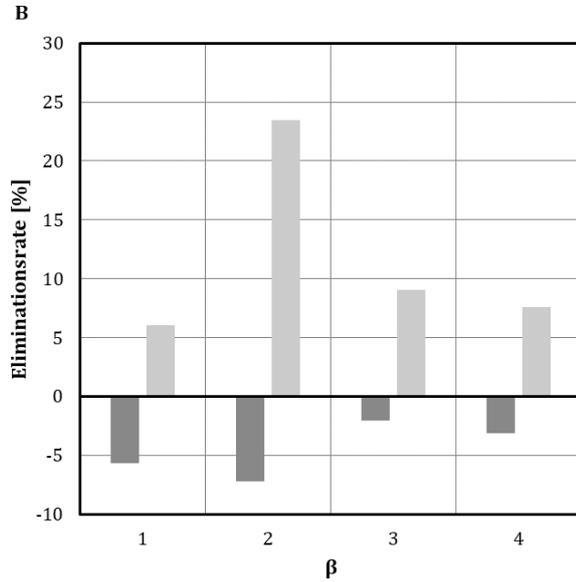
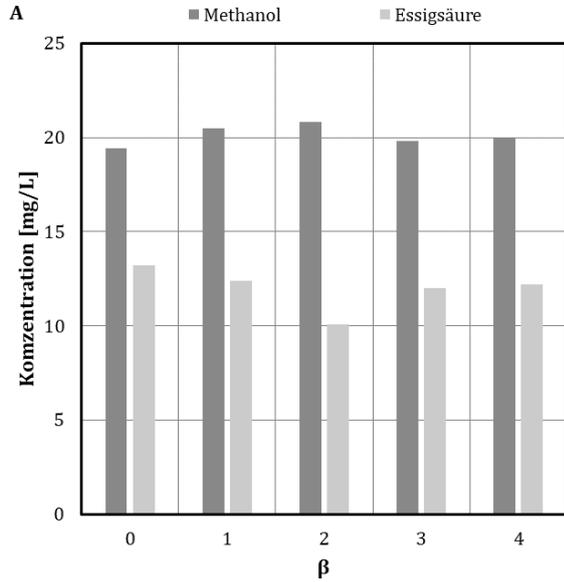
		PAKs								
		<i>Chrysen</i>	<i>Dibenzo[ah]anthracen</i>	<i>Fluoranthen</i>	<i>Fluoren</i>	<i>Indeno[1,2,3-cd]pyren</i>	<i>Naphthalin</i>	<i>Phenanthren</i>	<i>Pyren</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	
		CS-1-2-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	< 0,01
		CS-1-3-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,020	< 0,01
		CS-1-4-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	< 0,01
		CS-1-5-191121	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	< 0,01
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		CS-2-2-191126	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,030	0,020	0,020
		CS-2-3-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	< 0,01
		CS-2-4-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,040	< 0,01
		CS-2-5-191126	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	0,010

		SONSTIGE				
		<i>Acesulfam-K</i>	<i>Bisphenol A</i>	<i>Benzotriazol</i>	<i>PFOS</i>	
Typ	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Methanol	BS	CS-1-1-191121	3,800	0,080	9,100	< 0,05
		CS-1-2-191121	3,800	< 0,05	8,800	< 0,05
		CS-1-3-191121	3,800	0,060	8,600	< 0,05
		CS-1-4-191121	4,300	< 0,05	9,600	< 0,05
		CS-1-5-191121	4,200	< 0,05	9,100	< 0,05
Essigsäure	BS	CS-2-1-191126	4,500	< 0,05	11,000	< 0,05
		CS-2-2-191126	5,600	< 0,05	11,000	< 0,05
		CS-2-3-191126	6,000	< 0,05	11,000	< 0,05
		CS-2-4-191126	5,600	0,060	10,000	< 0,05
		CS-2-5-191126	5,900	< 0,05	10,000	< 0,05

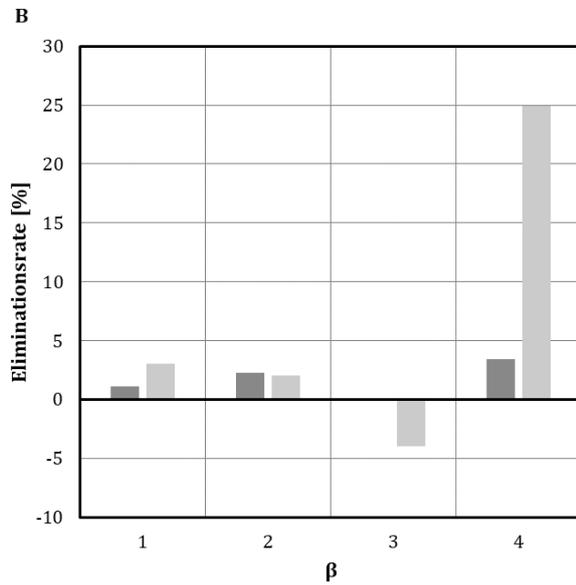
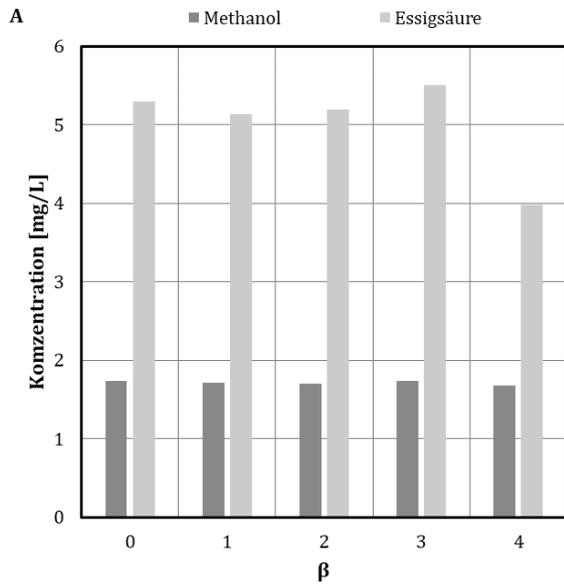
## 2 Grafische Darstellung

### 2.1 Nähr- und Zehrstoffe

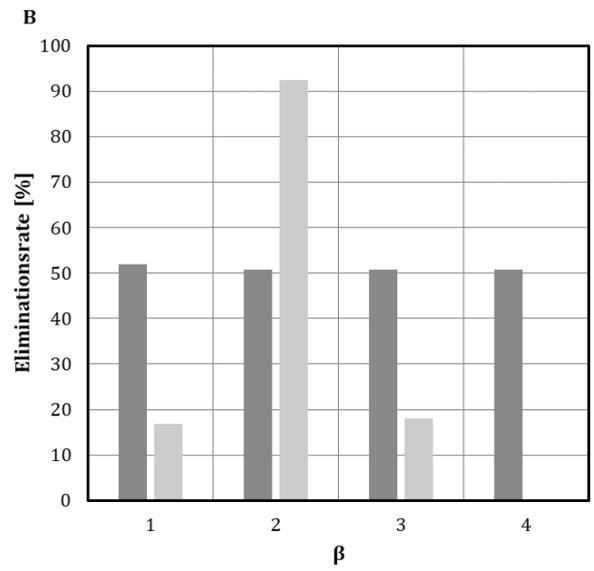
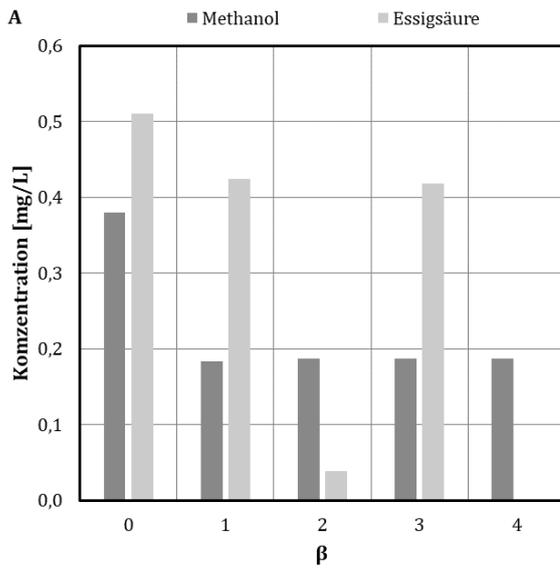
#### Gesamt-Stickstoff



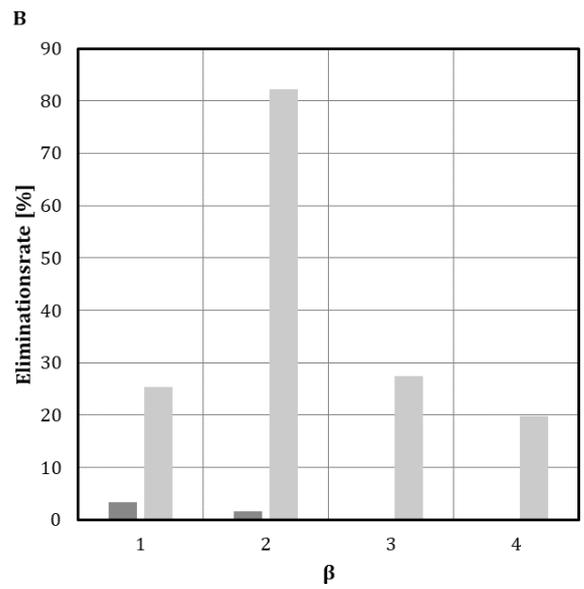
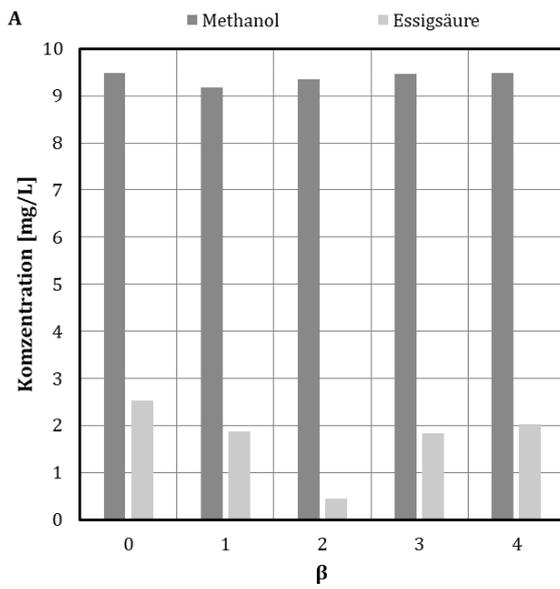
#### Ammonium-Stickstoff



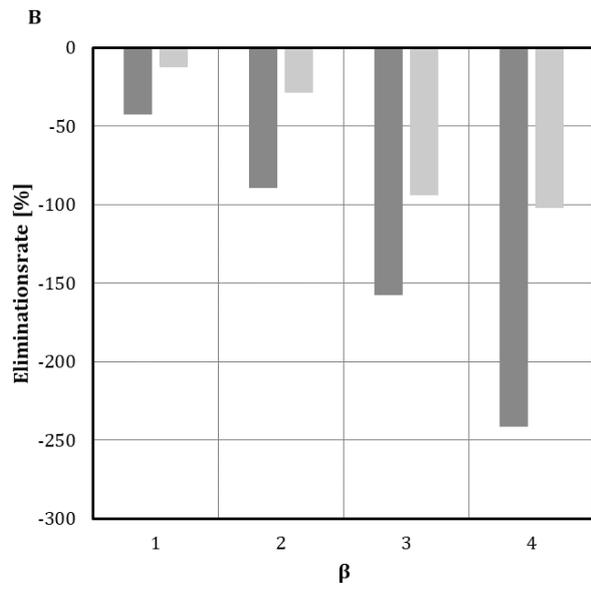
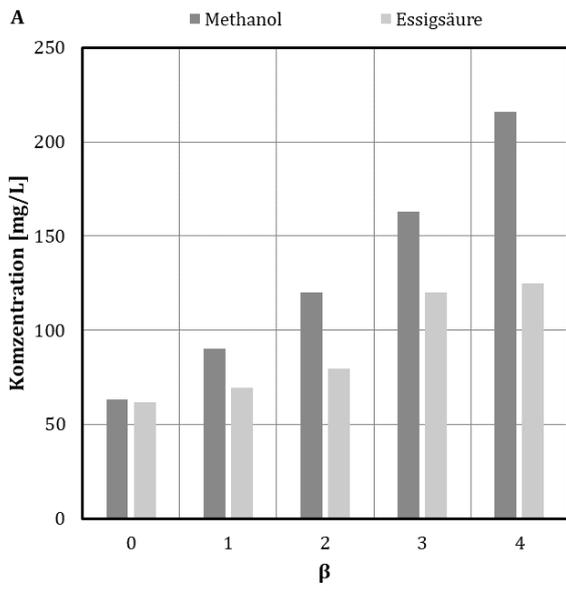
*Nitrit-Stickstoff*



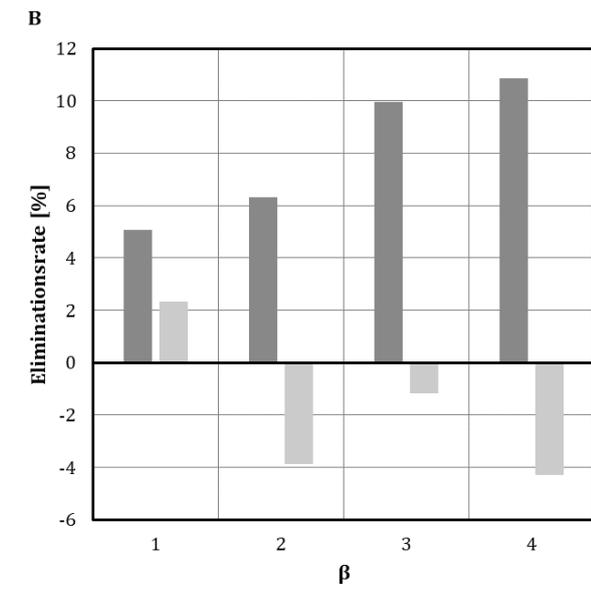
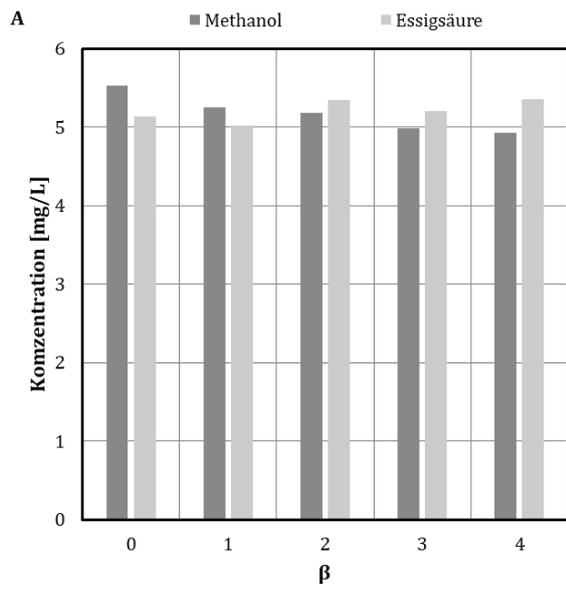
*Nitrat-Stickstoff*



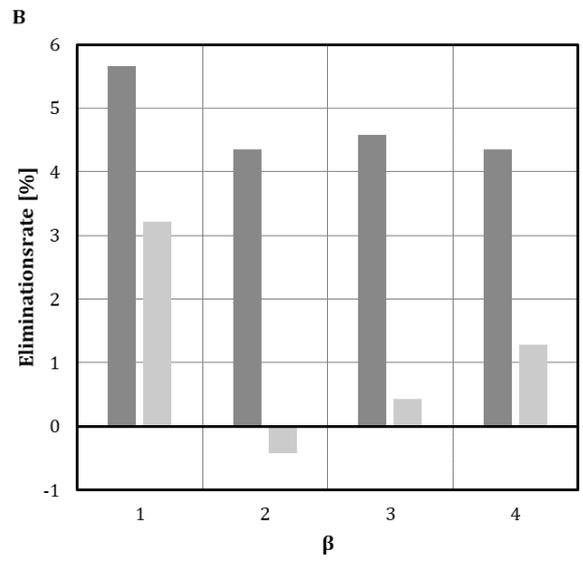
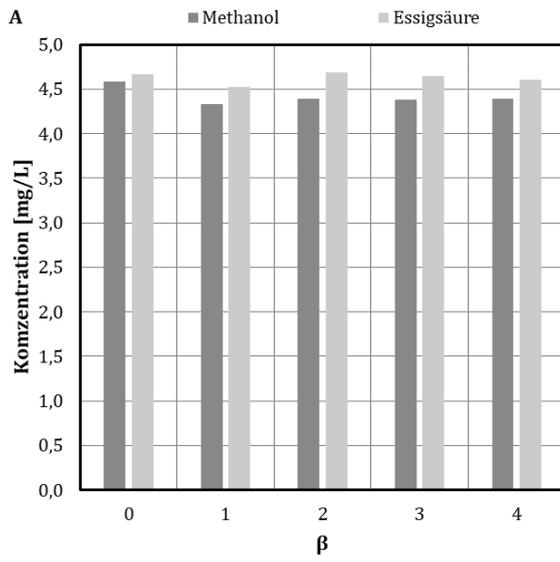
CSB



Gesamt-Phosphor

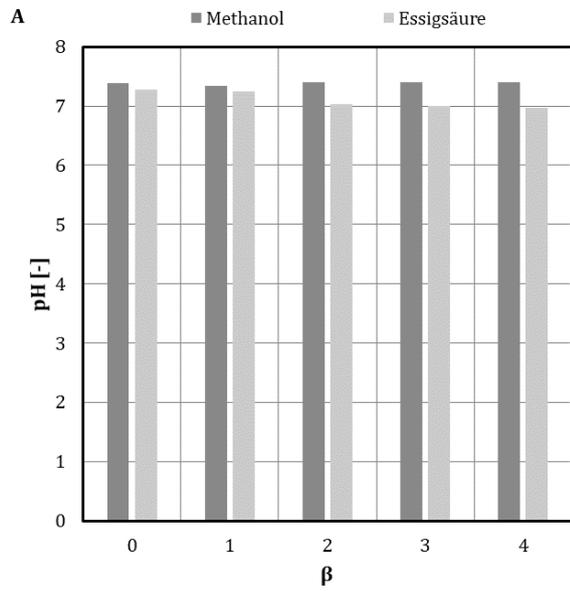


*Ortho-Phosphat*

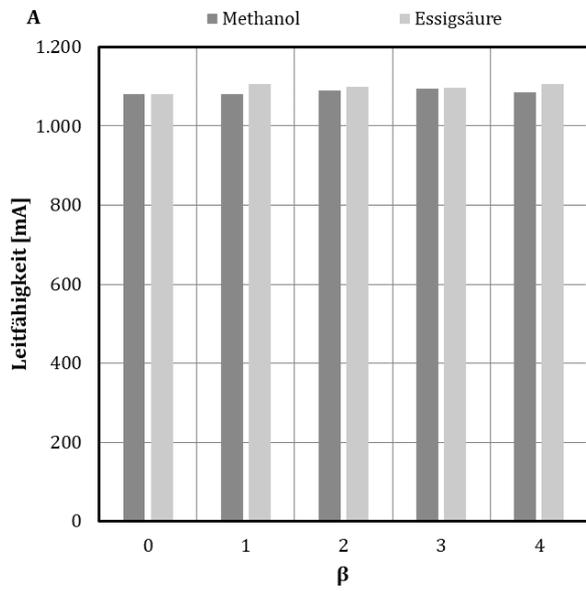


## 2.2 Begleitparameter

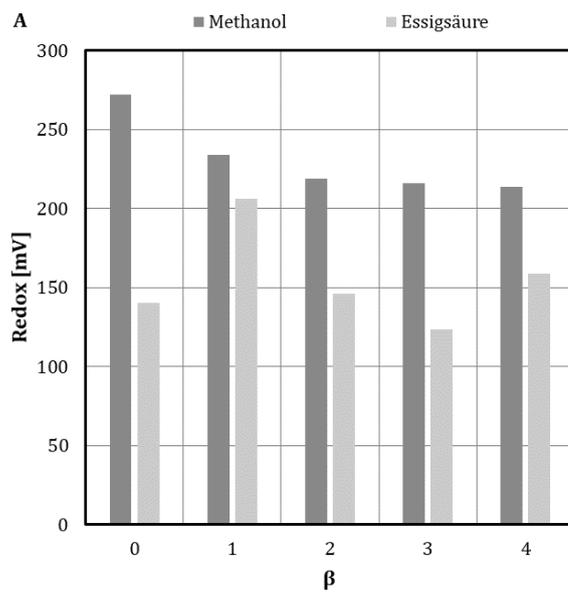
### *pH-Wert*



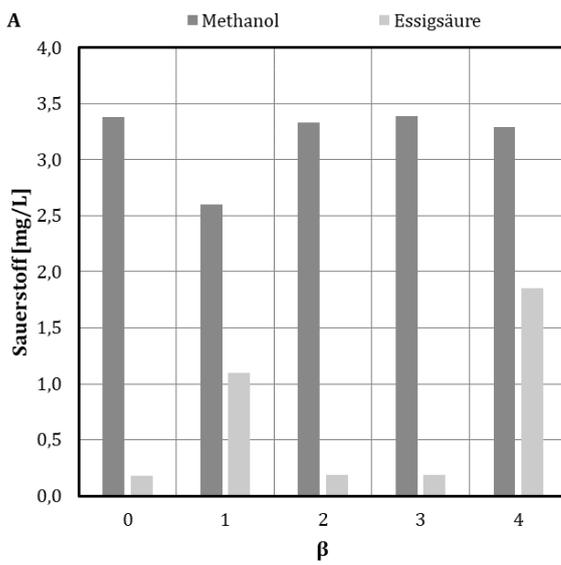
### *Leitfähigkeit*



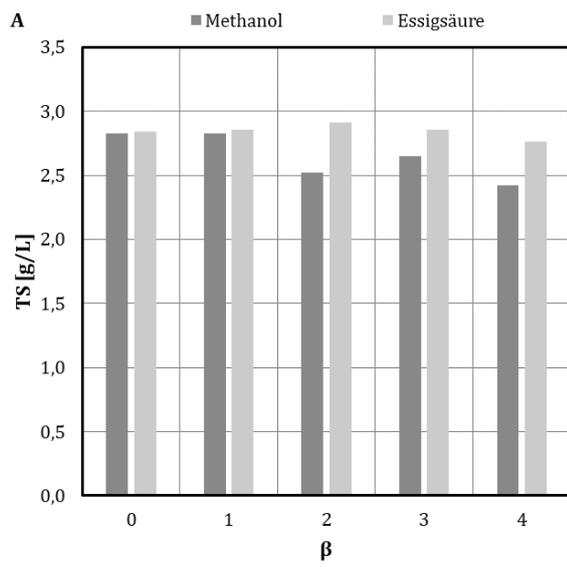
*Redox*



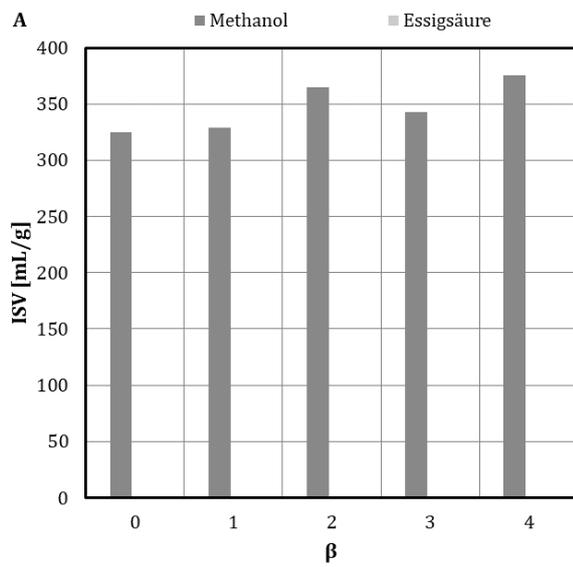
*Sauerstoff*



TS



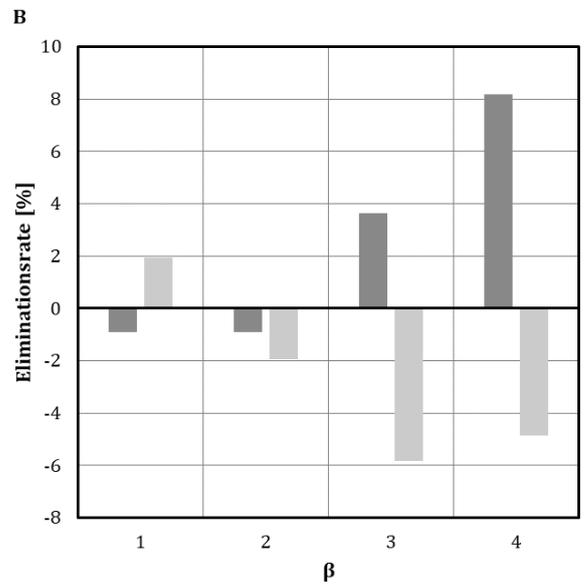
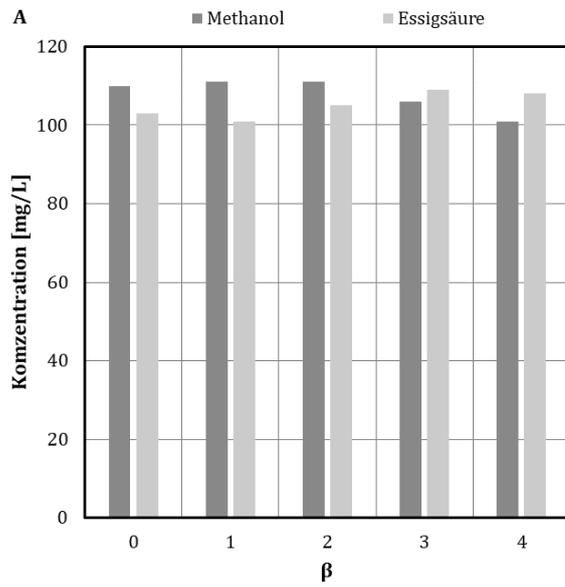
Schlammindex



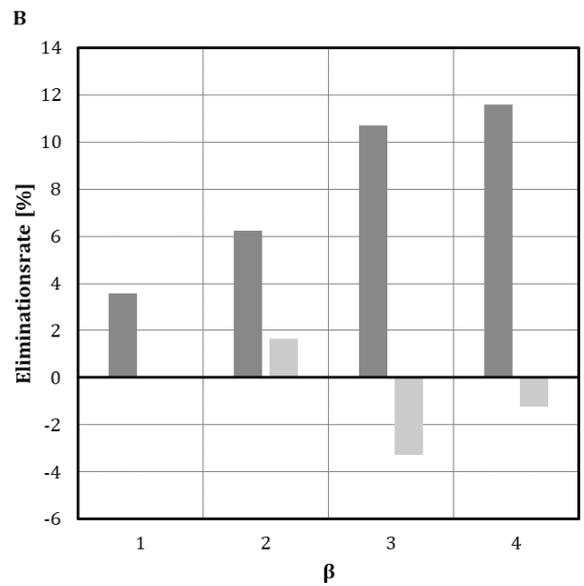
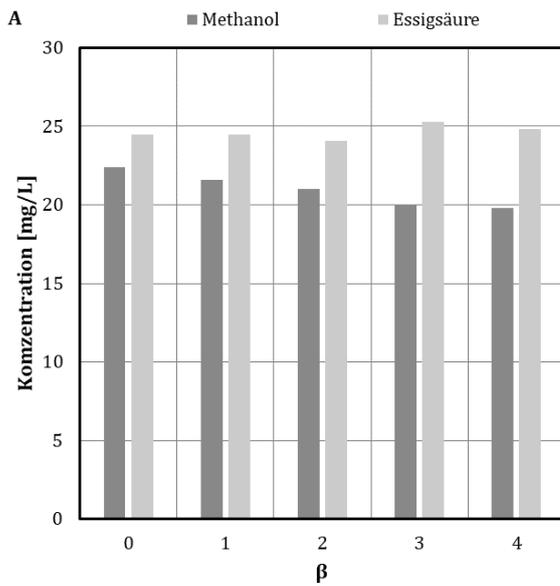
Anmerkungen: ISV Daten für Essigsäure fehlen.

## 2.3 Hauptionen

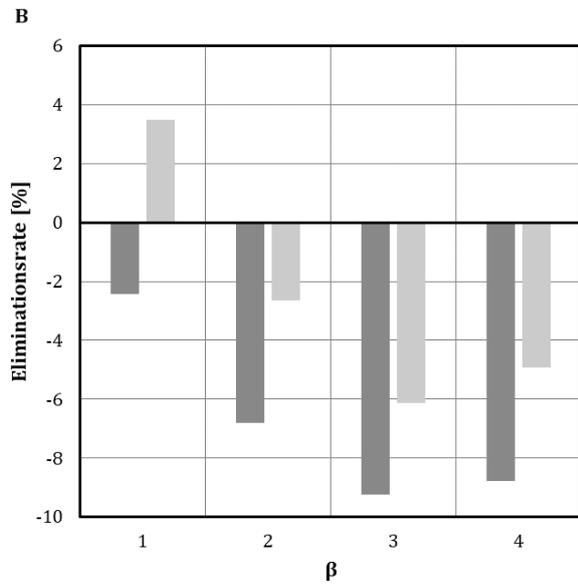
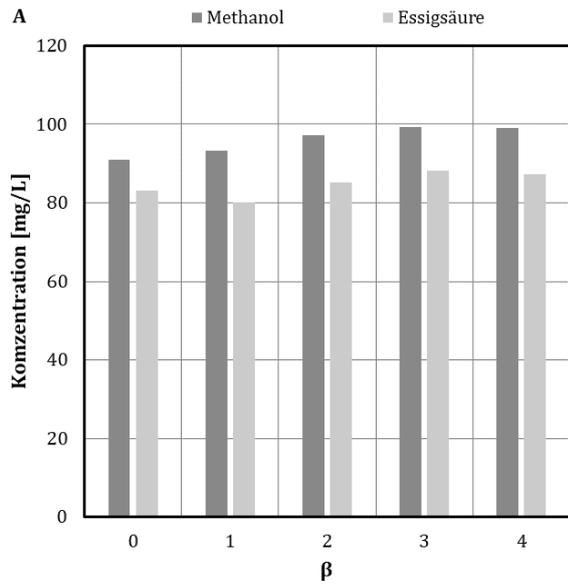
### Natrium



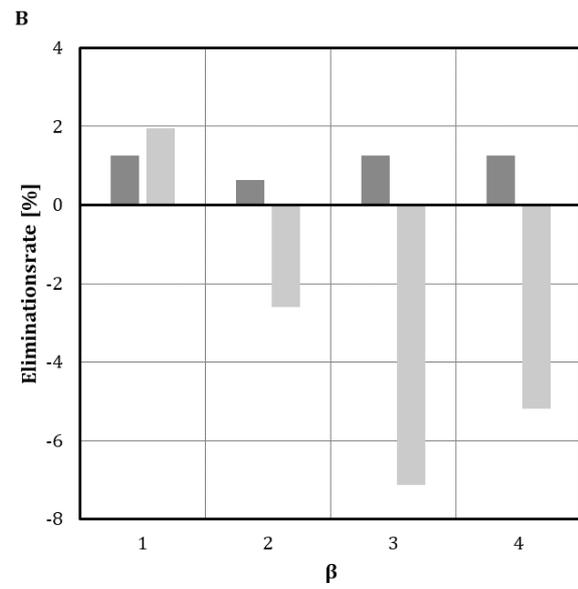
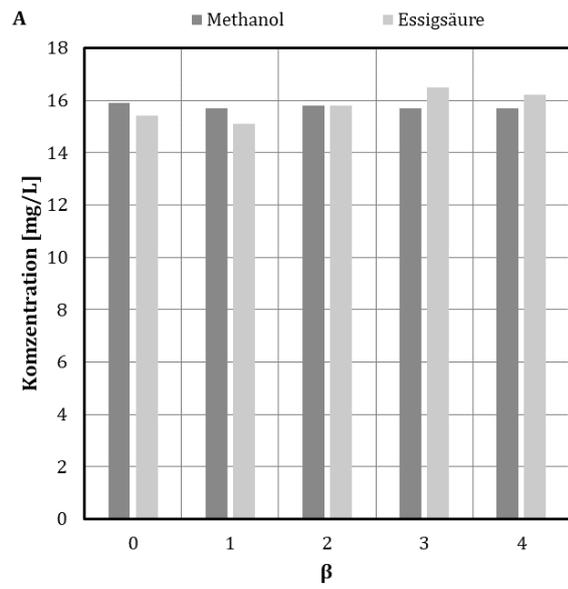
### Kalium



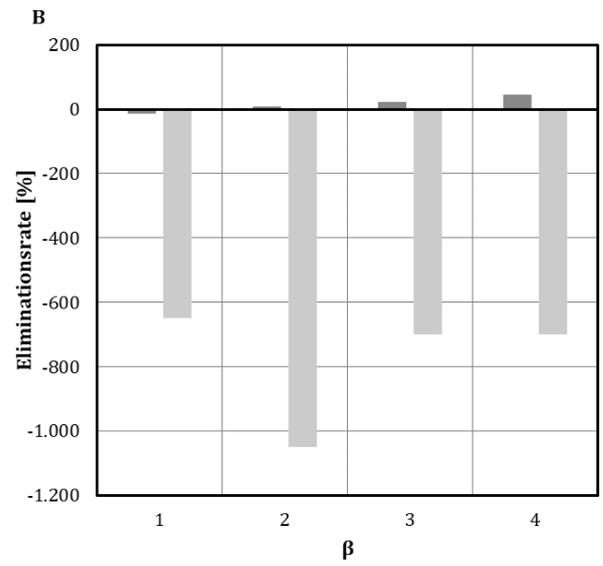
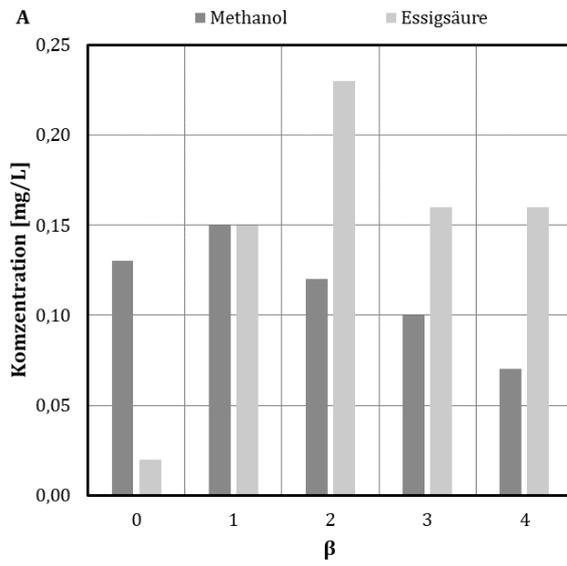
Calcium



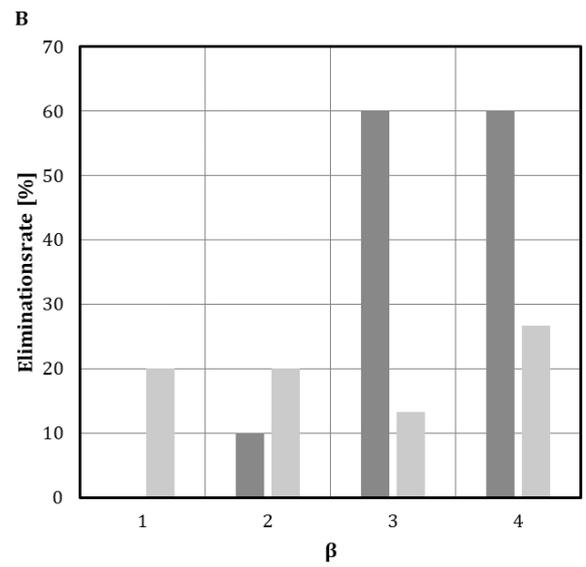
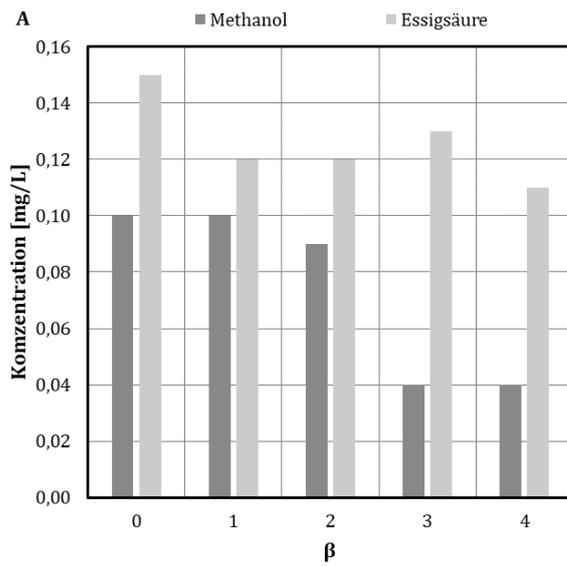
Magnesium



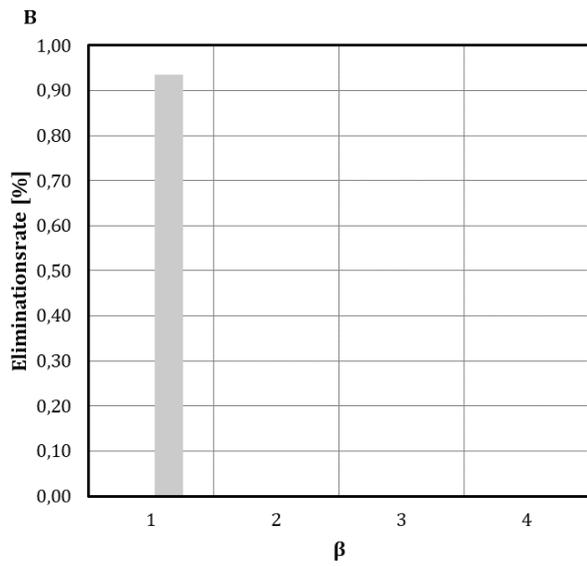
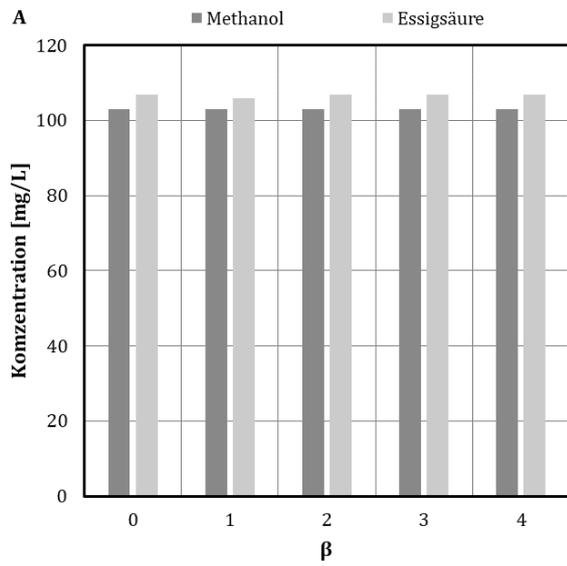
*Eisen ges.*



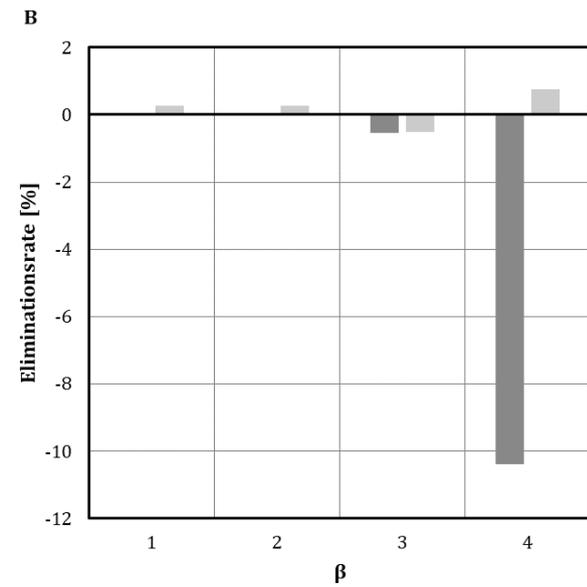
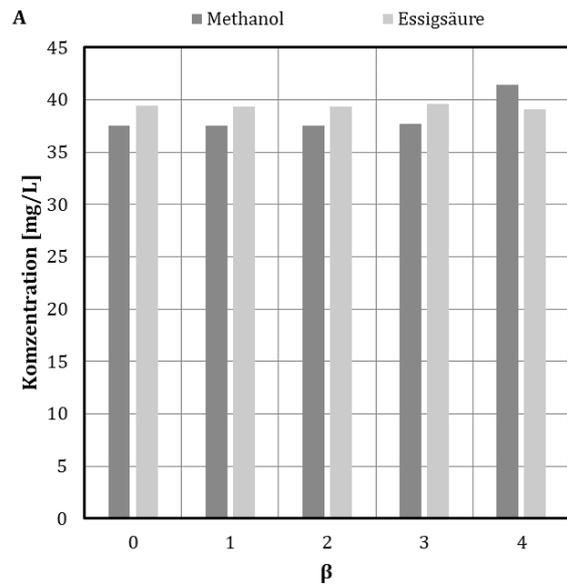
*Aluminium ges.*



*Chlorid*



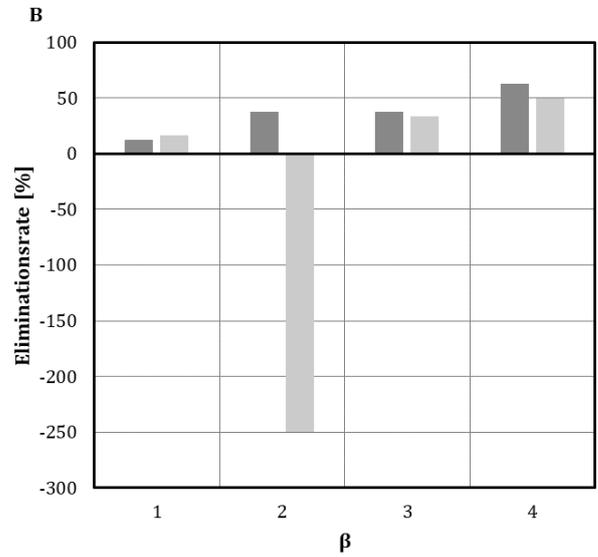
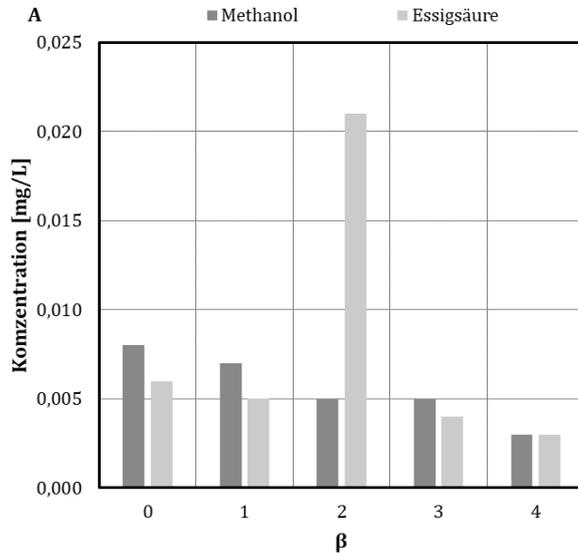
*Sulfat*



## 2.4 Spurenstoffe

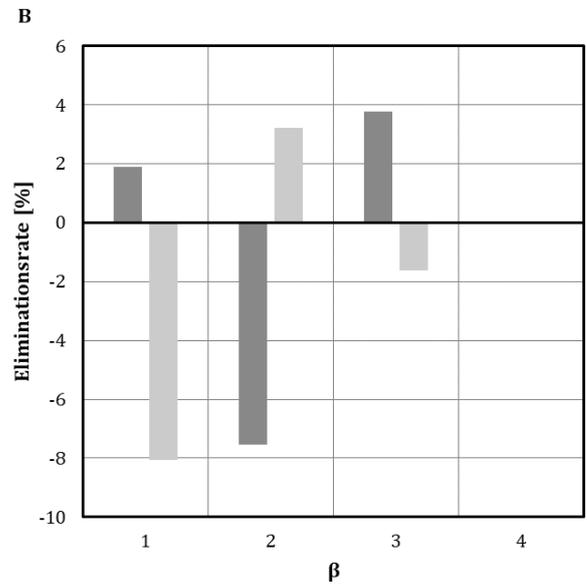
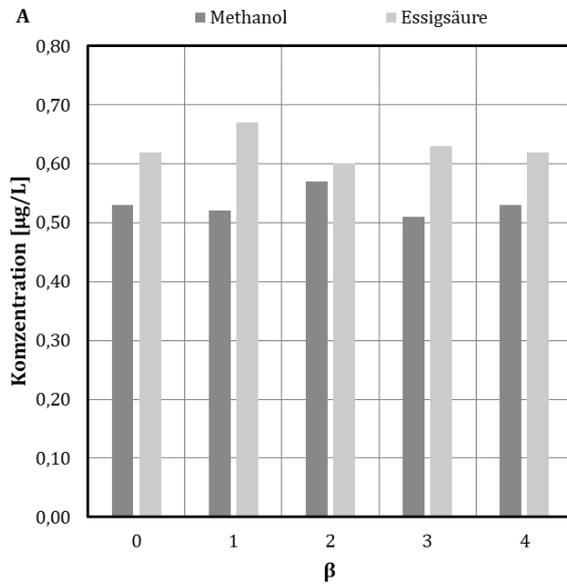
### 2.4.1 Schwermetalle

Nickel

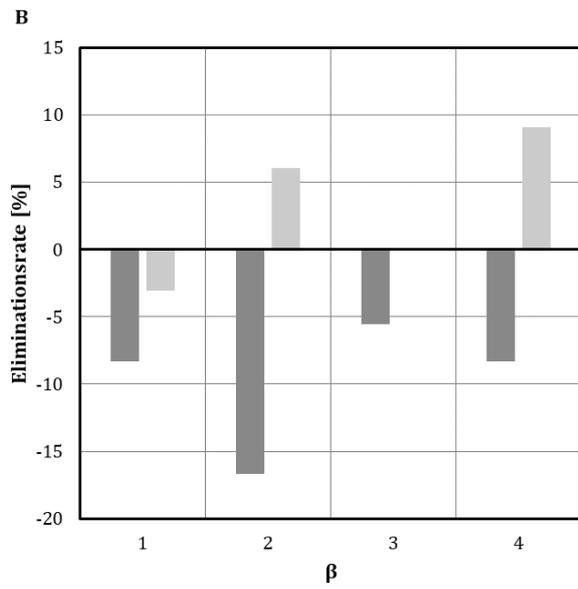
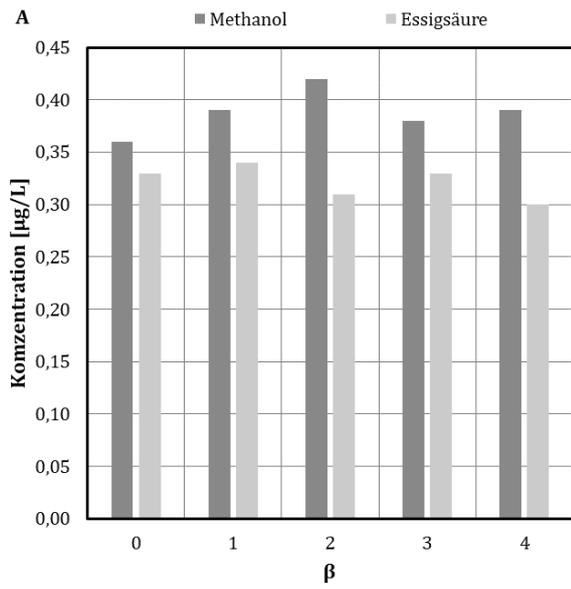


### 2.4.2 Arzneistoffe

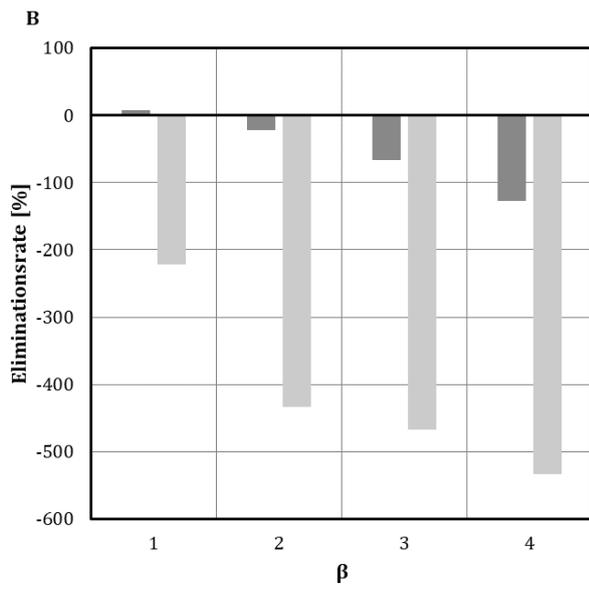
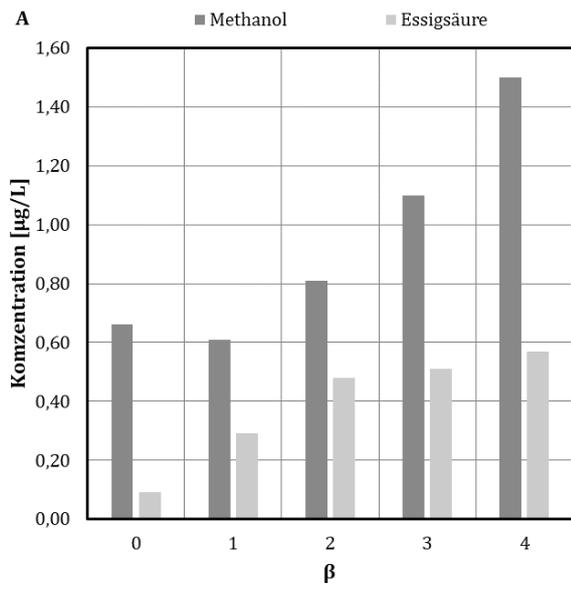
Carbamazepin



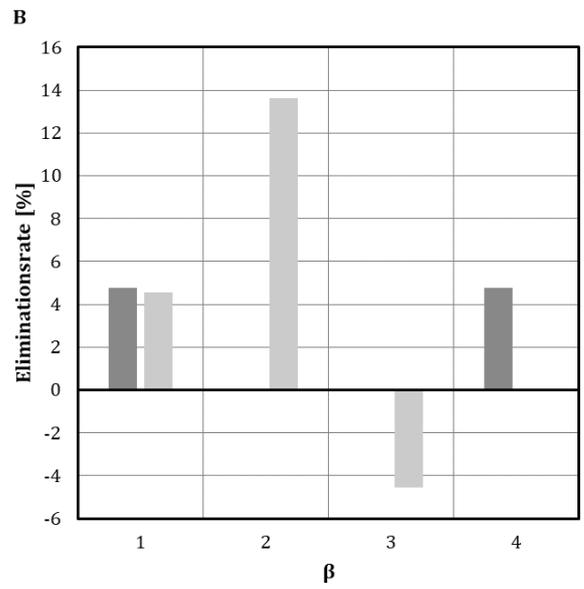
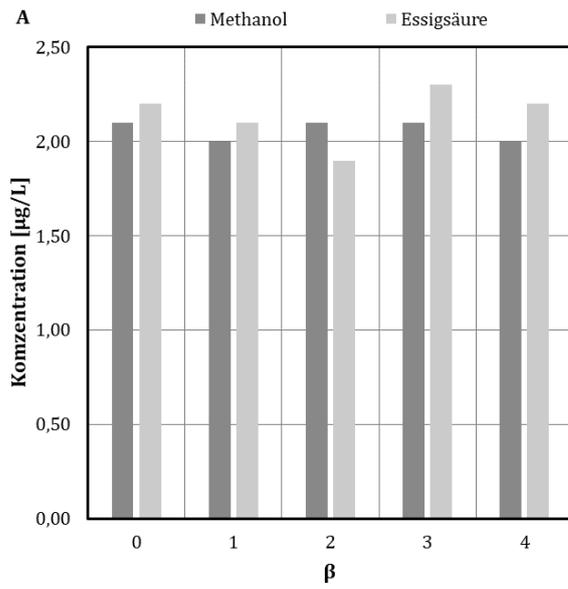
*Ciprofloxacin*



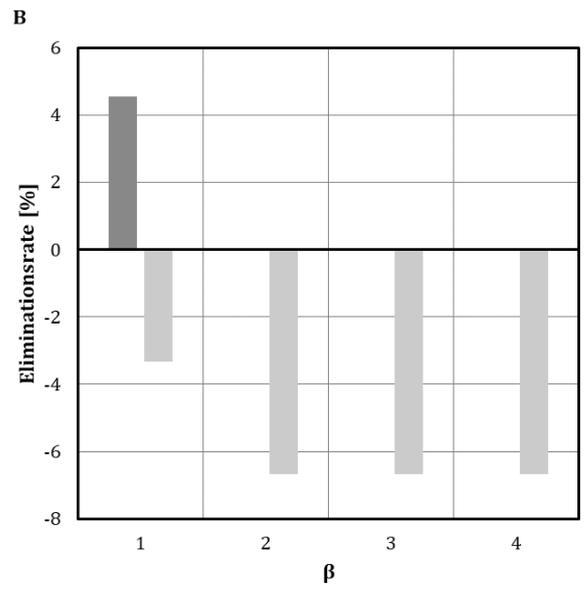
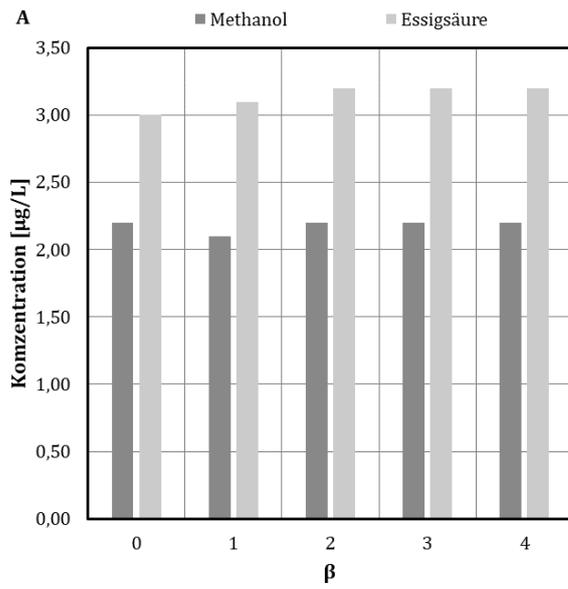
*Coffein*



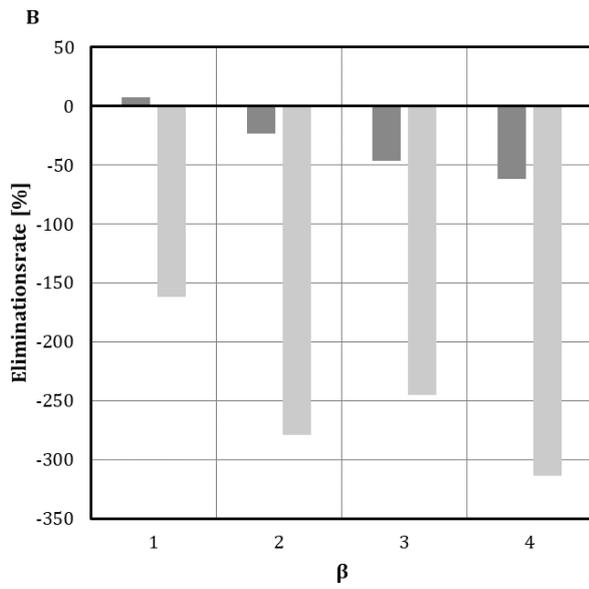
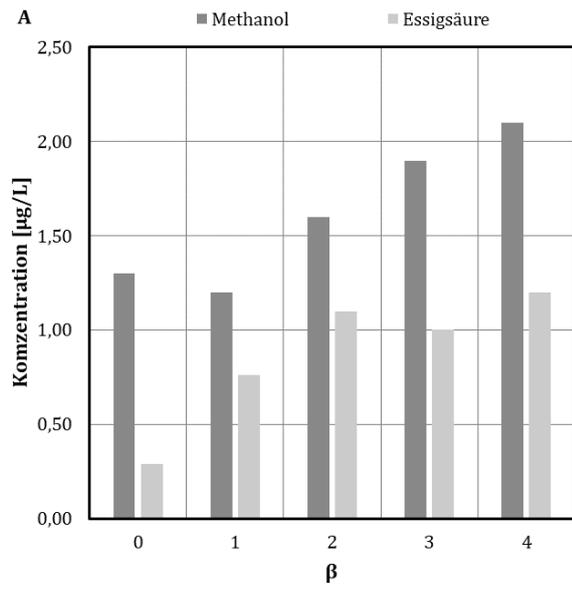
*Diclofenac*



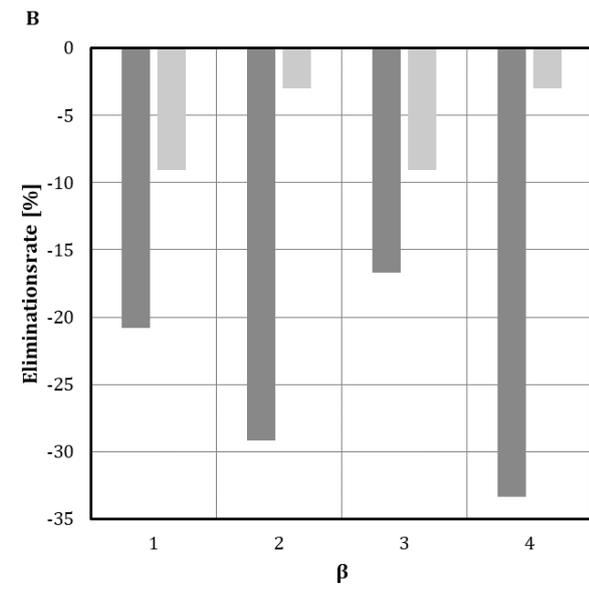
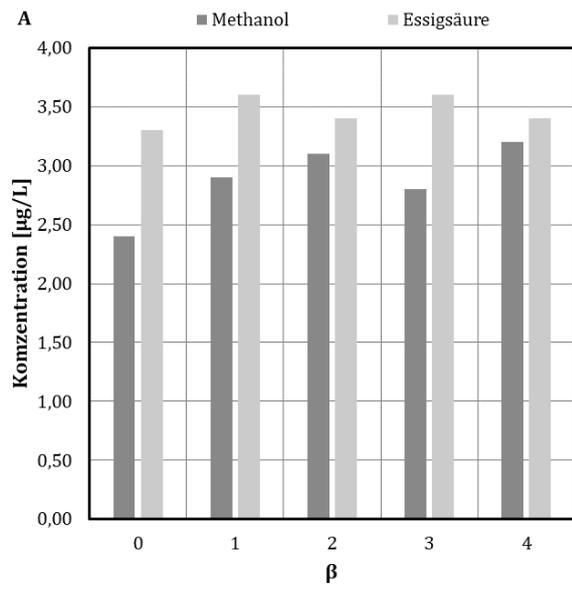
*Gabapentin*



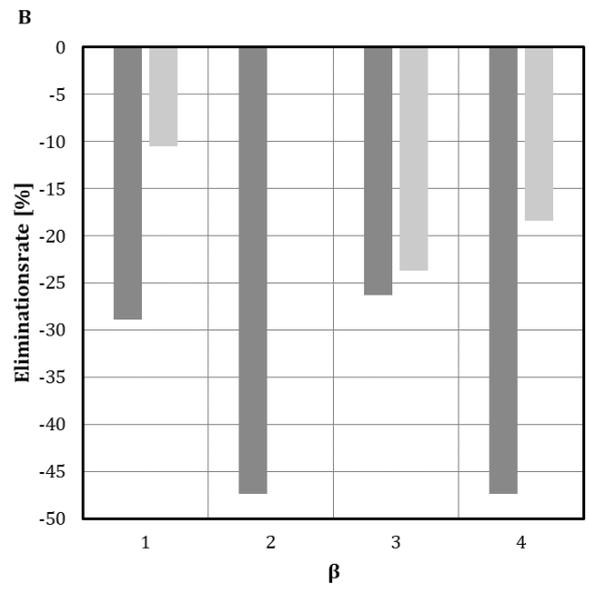
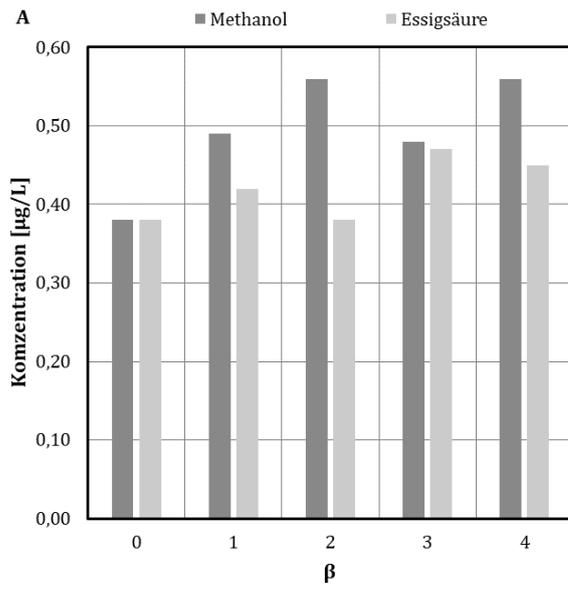
*Metformin*



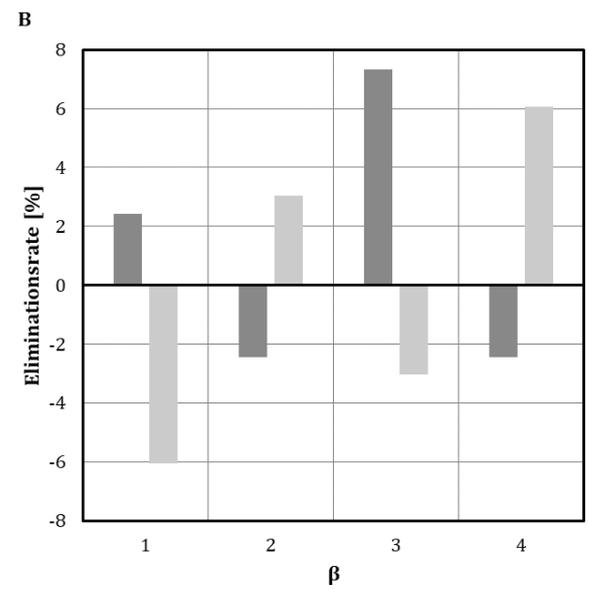
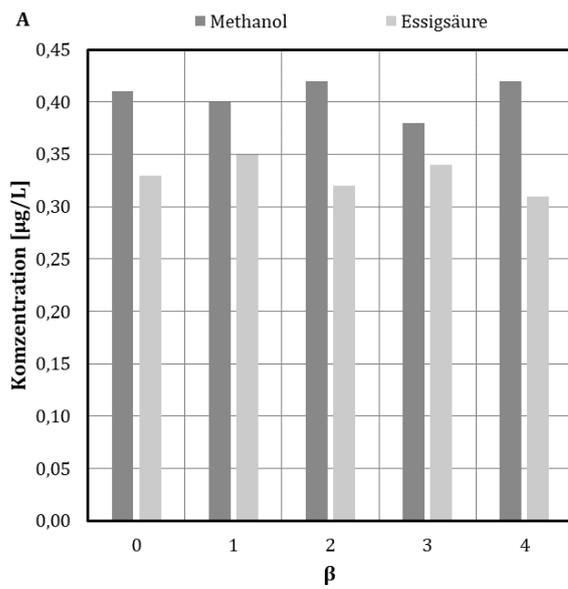
*Metoprolol*



*Sulfamethoxazol*

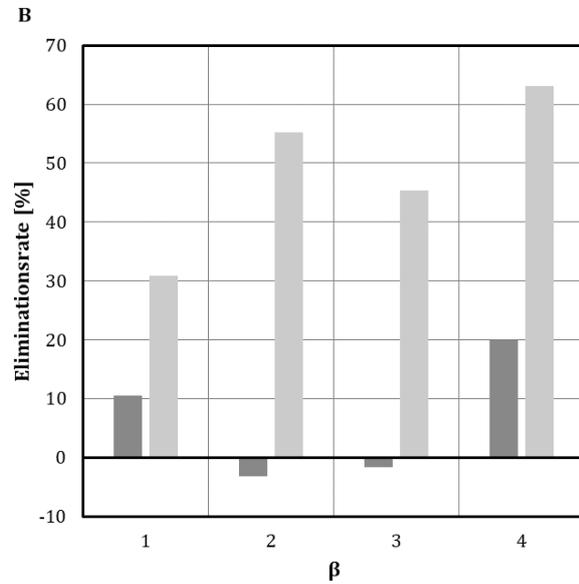
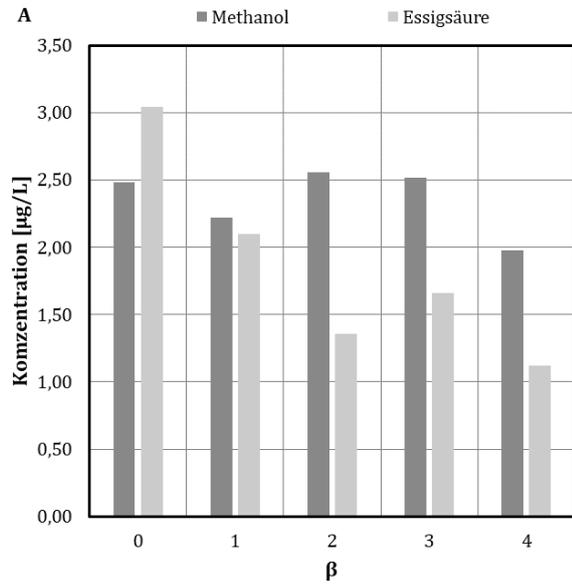


*Trimethoprim*

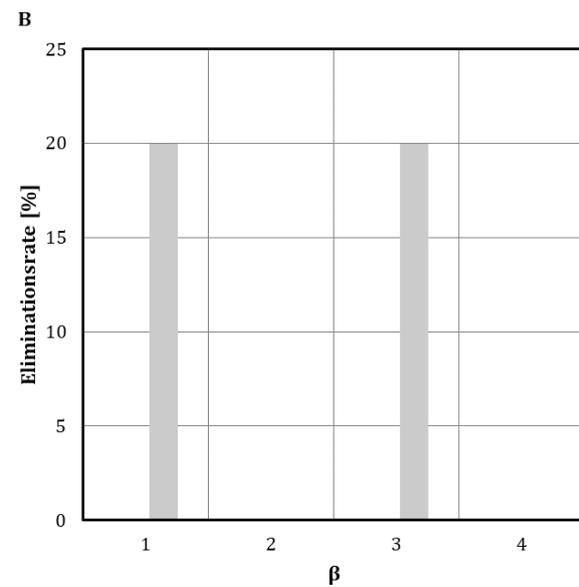
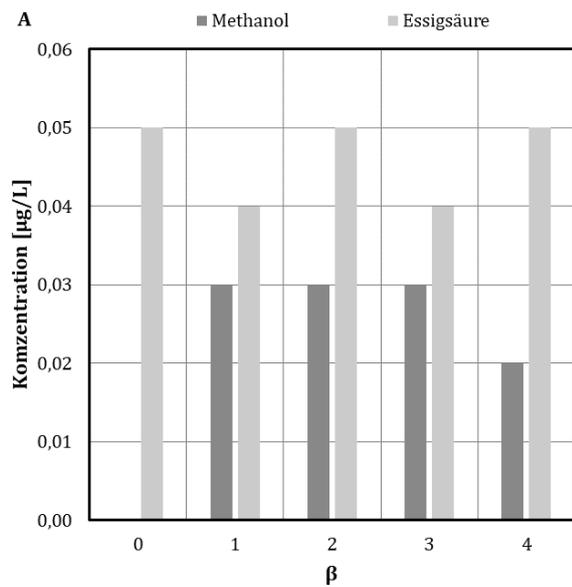


### 2.4.3 Pflanzenschutzmittel

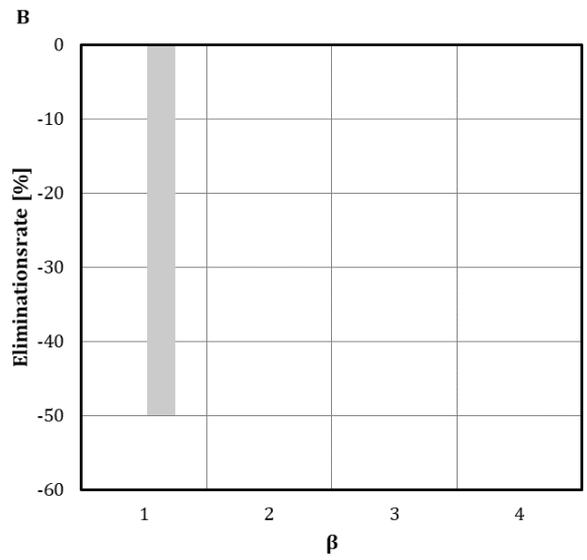
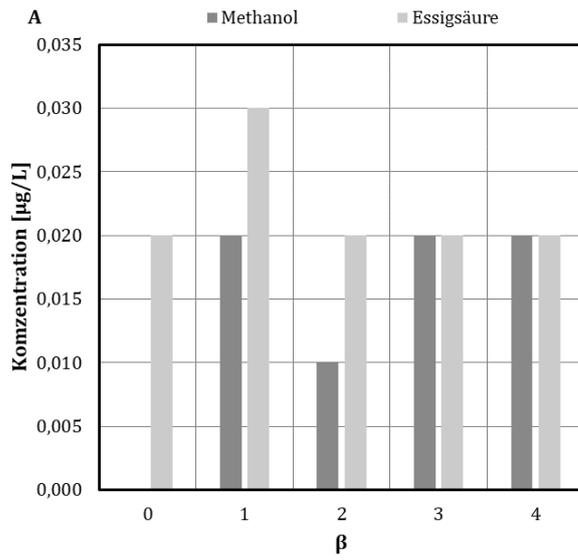
#### Glyphosat



#### Imidacloprid

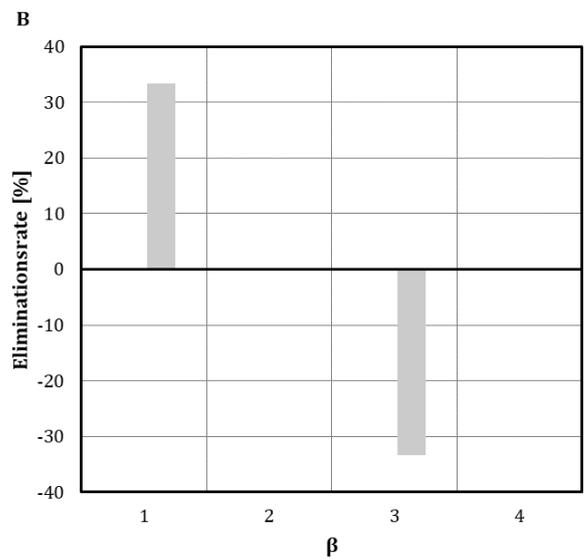
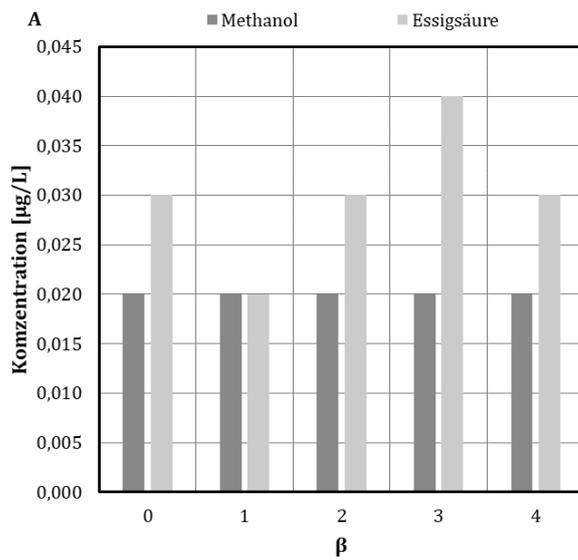


*Naphthalin*



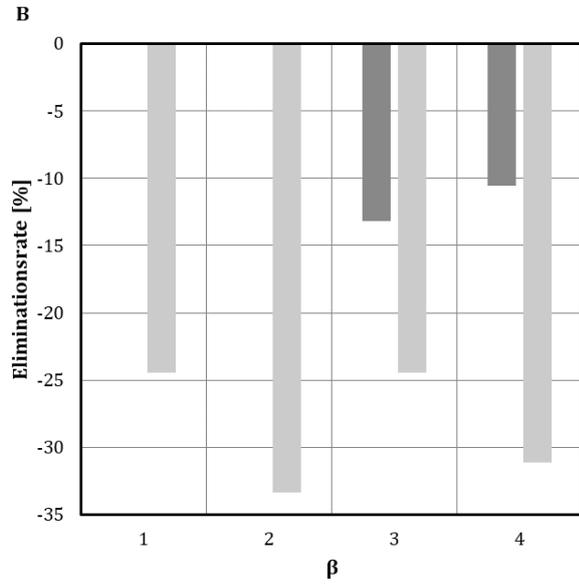
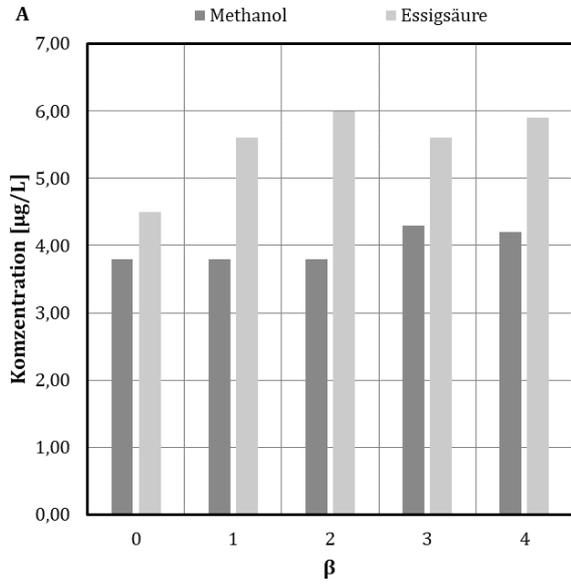
**2.4.4 PAKs**

*Phenanthren*

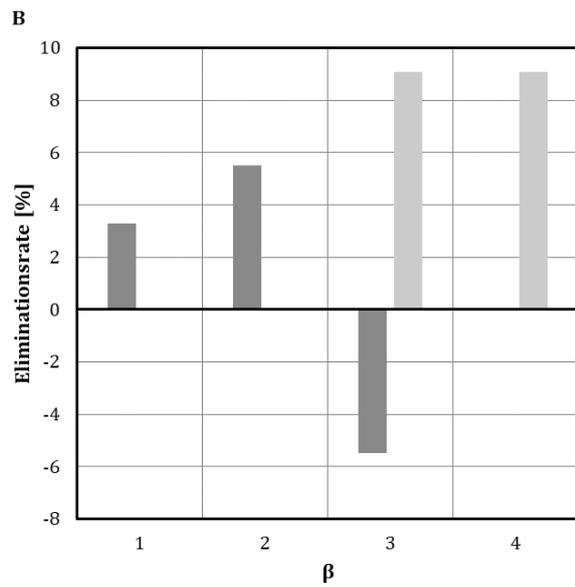
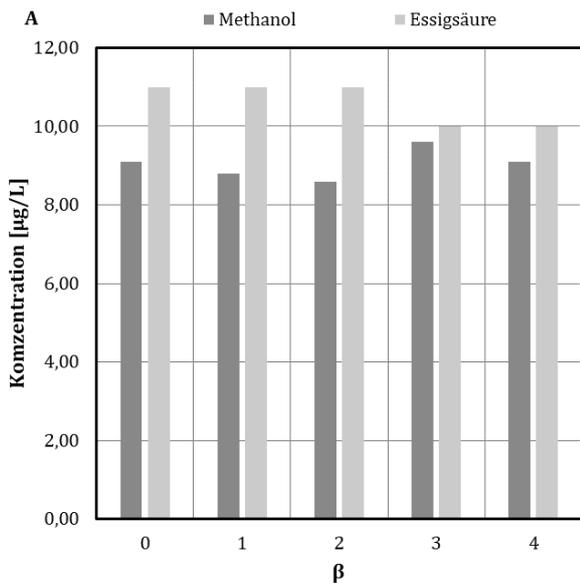


### 2.4.5 Sonstige

#### *Acesulfam-K*

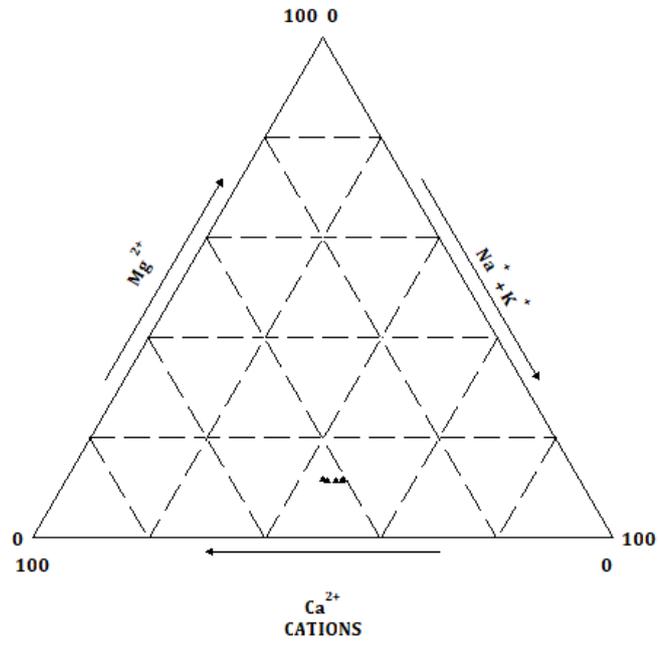


#### *Benzotriazol*

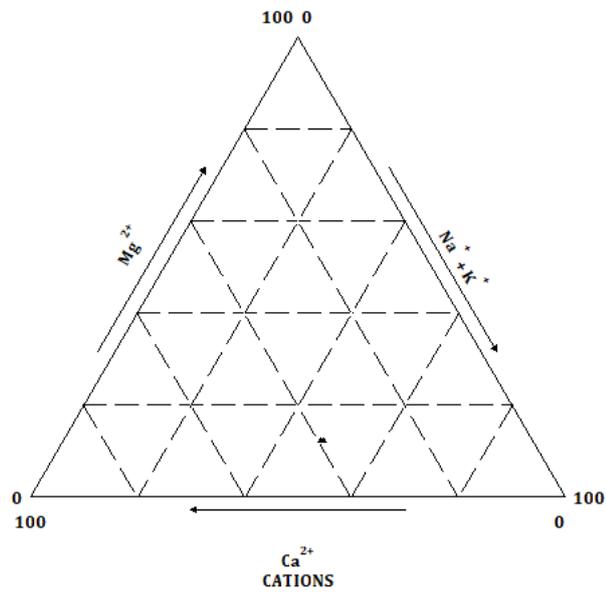


## 2.5 Ionenverteilung

*Methanol*



*Essigsäure*





## Anhang 3 – Sorptionskoeffizienten $k_d$

**Anmerkung:** Die Sorptionskoeffizienten für die folgend mit einem \* gekennzeichneten Stoffe sind Mindestwerte. Für diese Stoffe konnte in der Ablaufprobe (Klarwasser) keine Konzentration oberhalb der Bestimmungsgrenze festgestellt werden. Die Berechnung des Sorptionskoeffizienten erfolgte dann auf Basis der Bestimmungsgrenze und stellt somit einen Minimalwert dar.

Eine Zusammenstellung der Korrelationskoeffizienten gibt Tabelle 18 (Abs. 4.3.5) wieder.

1	Tabellarische Zusammenstellung.....	170
1.1	Analyseergebnisse .....	170
1.2	Biodegradationskonstanten.....	190
1.3	Sorptionskoeffizienten .....	191
2	Grafische Zusammenstellung.....	193
2.1	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung $TS_{BB}$ .....	193
2.2	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm $TS_{ÜS}$ .....	200
2.3	Einfluss des Schlammalter $t_{TS}$ .....	207
2.4	Einfluss der Schlammbelastung $B_{TS}$ .....	214

# 1 Tabellarische Zusammenstellung

## 1.1 Analyseergebnisse

### 1. Messwoche

Typ		BEGLEITPARAMETER								
		Q <sub>h</sub>	pH	LF	Redox	O <sub>2</sub>	T	TS	SV	ISV
		[m <sup>3</sup> /h]	[-]	[μS/cm]	[mV]	[mg/l]	[°C]	[g/l]	[mL/L]	[mL/g]
Zulauf	VAK-1-191008-22	1,067	7,88	1345	56,6	0,88	12,1	0,01	n.s.	n.s.
	VAK-1-191009-06	0,996	7,97	1497	74,7	3,35	14,5	0,02	n.s.	n.s.
	VAK-1-191009-14	1,055	8,39	1505	51,7	0,67	12,7	n.d.	n.s.	n.s.
	VAK-1-191009-22	1,076	7,81	1430	122,1	0,08	12,5	0,12	n.s.	n.s.
	VAK-1-191010-06	1,019	7,91	1539	165,9	0,99	13,8	0,80	n.s.	n.s.
	VAK-1-191010-14	1,001	8,13	1476	108,0	0,08	12,3	0,09	n.s.	n.s.
	VAK-1-191010-22	1,039	7,85	1339	126,3	0,67	13,4	0,12	n.s.	n.s.
	VAK-1-191011-06	1,005	7,92	1517	152,3	2,51	15,9	0,02	n.s.	n.s.
	VAK-1-191011-14	0,995	8,15	1425	120,4	0,83	12,6	0,23	n.s.	n.s.
Belebschlamm	VAK-2-191008-22	5,509	7,46	1102	82,4	0,08	12,7	3,54	570	161
	VAK-2-191009-06	5,454	7,44	1063	53,4	0,17	13,7	3,51	500	142
	VAK-2-191009-14	5,452	7,32	1036	153,5	1,04	12,6	3,56	600	169
	VAK-2-191009-22	5,519	7,36	1015	167,8	0,08	12,9	3,96	540	136
	VAK-2-191010-06	5,549	7,37	1019	151,2	0,07	14,1	4,07	570	140
	VAK-2-191010-14	5,570	7,36		145,5	0,52	12,9	3,80	600	158
	VAK-2-191010-22	5,577	7,37	1012	170,2	0,31	13,7	3,93	570	145
	VAK-2-191011-06	5,502	7,41	1017	187,8	0,17	14,2	4,06	570	140
	VAK-2-191011-14	5,474	7,34	1010	186,6	0,14	13,4	3,99	570	143
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	0,023	7,37		-48,3	0,06	20,0	5,82	840	144
	VAK-3-191009-06	0,021	7,39	1106	-37,2	0,08	20,6	5,63	880	156
	VAK-3-191009-14	0,020	7,35	1027	15,8	0,10	18,7	5,76	880	153
	VAK-3-191009-22	0,013	7,36	1026	127,9	0,07	20,0	6,09	840	138
	VAK-3-191010-06	0,020	7,38	1030	113,4	0,06	17,4	5,73	800	140
	VAK-3-191010-14	0,020	7,35	1033	66,5	0,45	17,2	5,54	960	173
	VAK-3-191010-22	0,023	7,38	1015	133,4	0,59	13,1	6,05	800	132
	VAK-3-191011-06	0,019	7,39	1012	180,7	0,18	14,0	6,32	800	127
	VAK-3-191011-14	0,020	7,40	997	157,3	0,15	13,0	6,12	920	150
Ablauf	VAK-4-191008-22	1,045	7,73	1345	125,0	6,01	18,5	0,01	n.s.	n.s.
	VAK-4-191009-06	0,974	7,69	1228	139,0	5,82	16,8	0,03	n.s.	n.s.
	VAK-4-191009-14	1,035	7,74	1044	137,0	7,16	18,1		n.s.	n.s.
	VAK-4-191009-22	1,063	7,63	1045	192,7	6,95	18,0	0,05	n.s.	n.s.
	VAK-4-191010-06	0,999	7,70	1040	209,0	4,77	18,0	0,12	n.s.	n.s.
	VAK-4-191010-14	0,981	7,62	1057	277,0	5,49	18,8	0,04	n.s.	n.s.
	VAK-4-191010-22	1,017	7,66	1055	266,0	7,08	18,4	0,02	n.s.	n.s.
	VAK-4-191011-06	0,986	7,72	1022	286,0	5,59	18,3	0,04	n.s.	n.s.
	VAK-4-191011-14	0,975	7,62	1033	270,0	6,87	18,4	0,07	n.s.	n.s.

Typ		BEGLEITPARAMETER						
		CSB	BSB <sub>5</sub>	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191008-22	620,0	490,0	79,8	56,5	0,0	0,8	9,8
	VAK-1-191009-06	548,0	460,0	93,2	66,4	0,0	0,7	9,0
	VAK-1-191009-14	501,0	n.s.	90,9	69,5	0,0	1,1	9,8
	VAK-1-191009-22	669,0	500,0	82,7	58,8	0,0	0,8	9,2
	VAK-1-191010-06	546,0	420,0	94,7	69,1	0,0	0,8	9,3
	VAK-1-191010-14	577,0	420,0	95,3	74,1	0,0	0,9	10,5
	VAK-1-191010-22	674,0	460,0	79,5	50,7	0,0	0,8	9,3
	VAK-1-191011-06	765,0	560,0	95,3	69,3	0,0	0,7	9,1
Belebtschlamm	VAK-1-191011-14	528,0	360,0	87,4	67,1	0,1	0,9	6,8
	VAK-2-191008-22	32,5	n.s.	18,9	15,1	0,1	0,1	31,6
	VAK-2-191009-06	55,8	n.s.	13,4	7,2	0,2	3,5	6,5
	VAK-2-191009-14	35,2	n.s.	13,7	0,3	0,0	12,2	5,4
	VAK-2-191009-22	32,4	n.s.	13,3	0,3	0,1	11,4	5,7
	VAK-2-191010-06	44,6	n.s.	11,2	0,2	0,1	6,8	6,1
	VAK-2-191010-14	51,6	n.s.	11,7	1,1	0,1	7,1	6,1
	VAK-2-191010-22	40,4	n.s.	10,9	0,5	0,1	8,3	6,4
	VAK-2-191011-06	80,6	n.s.	9,3	0,2	0,0	6,6	6,5
Überschussschlamm	VAK-2-191011-14	38,0	n.s.	11,9	0,6	0,1	9,3	5,6
	VAK-3-191008-22	60,5	n.s.	25,5	19,2	0,0	0,8	15,2
	VAK-3-191009-06	54,9	n.s.	16,6	11,5	0,0	0,7	14,9
	VAK-3-191009-14	78,0	n.s.	10,7	3,8	0,0	1,2	10,7
	VAK-3-191009-22	78,3	n.s.	5,5	1,8	0,0	0,9	11,3
	VAK-3-191010-06	63,6	n.s.	5,4	1,2	0,0	4,2	9,8
	VAK-3-191010-14	98,2	n.s.	3,7	1,7	0,0	0,7	10,5
	VAK-3-191010-22	46,6	n.s.	5,1	1,9	0,0	0,6	8,6
	VAK-3-191011-06	66,2	n.s.	5,2	0,8	0,0	0,5	9,5
Ablauf	VAK-3-191011-14	53,1	n.s.	4,2	1,1	0,0	0,6	8,6
	VAK-4-191008-22	52,9	n.s.	24,1	17,3	0,3	4,6	5,7
	VAK-4-191009-06	45,0	n.s.	19,6	3,6	0,2	10,7	5,6
	VAK-4-191009-14	46,2	n.s.	19,1	1,5	0,2	14,8	5,2
	VAK-4-191009-22	45,6	n.s.	19,5	0,1	0,1	17,2	5,4
	VAK-4-191010-06	78,3	n.s.	16,0	0,1	0,1	12,3	5,2
	VAK-4-191010-14	80,6	n.s.	16,6	0,6	0,2	9,8	5,9
	VAK-4-191010-22	120,0	n.s.	17,9	0,9	0,2	12,9	5,9
	VAK-4-191011-06	145,0	n.s.	13,7	0,1	0,1	10,3	6,2
VAK-4-191011-14	120,0	n.s.	15,2	0,4	0,1	13,1	6,0	

Typ		SCHWERMETALLE			
		<i>Blei (Pb)</i>	<i>Cadmium (Cd)</i>	<i>Nickel (Ni)</i>	<i>Quecksilber (Hg)</i>
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	ID-ges				
	VAK-1-191008-22	0,006	0,001	0,009	< 0,0001
	VAK-1-191009-06	< 0,005	< 0,001	0,010	< 0,0001
	VAK-1-191009-14	0,008	0,001	0,008	< 0,0001
	VAK-1-191009-22	0,007	< 0,001	0,010	0,000
	VAK-1-191010-06	0,006	< 0,001	0,014	0,000
	VAK-1-191010-14	< 0,005	< 0,001	0,008	< 0,0001
	VAK-1-191010-22	0,006	< 0,001	0,009	0,000
	VAK-1-191011-06	0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
VAK-1-191011-14	0,009	< 0,001	0,008	< 0,0001	
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	0,068	0,002	0,047	0,001
	VAK-2-191009-06	0,071	0,002	0,048	0,001
	VAK-2-191009-14	0,071	0,002	0,048	0,001
	VAK-2-191009-22	0,072	0,002	0,047	0,003
	VAK-2-191010-06	0,069	0,002	0,050	0,001
	VAK-2-191010-14	0,070	0,002	0,046	0,001
	VAK-2-191010-22	0,070	0,002	0,045	0,001
	VAK-2-191011-06	0,068	0,002	0,044	0,002
VAK-2-191011-14	0,070	0,002	0,053	0,002	
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	0,106	0,003	0,070	0,002
	VAK-3-191009-06	0,097	0,002	0,061	0,002
	VAK-3-191009-14	0,107	0,003	0,065	0,003
	VAK-3-191009-22	0,113	0,003	0,074	0,002
	VAK-3-191010-06	0,098	0,002	0,063	0,002
	VAK-3-191010-14	0,105	0,003	0,067	0,002
	VAK-3-191010-22	0,115	0,003	0,079	0,002
	VAK-3-191011-06	0,113	0,003	0,072	0,002
	VAK-3-191011-14	0,108	0,003	0,066	0,002
Ablauf	VAK-4-191008-22	< 0,005	< 0,001	0,005	< 0,0001
	VAK-4-191009-06	< 0,005	< 0,001	0,005	< 0,0001
	VAK-4-191009-14	< 0,005	< 0,001	0,005	< 0,0001
	VAK-4-191009-22	< 0,005	< 0,001	0,007	< 0,0001
	VAK-4-191010-06	< 0,005	< 0,001	0,004	< 0,0001
	VAK-4-191010-14	< 0,005	< 0,001	0,008	< 0,0001
	VAK-4-191010-22	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
	VAK-4-191011-06	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
	VAK-4-191011-14	< 0,005	< 0,001	0,004	< 0,0001

Typ		ARZNEISTOFFE					
		<i>Carbamazepin</i>	<i>Ciprofloxacin</i>	<i>Coffein</i>	<i>Diclofenac</i>	<i>Gabapentin</i>	<i>Ibuprofen</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges						
	VAK-1-191008-22	0,980	0,400	202	3,300	13,000	28,000
	VAK-1-191009-06	0,850	0,350	127	2,200	14,000	29,000
	VAK-1-191009-14	0,850	0,410	150	3,000	11,000	29,000
	VAK-1-191009-22	0,720	0,430	197	2,500	8,800	34,000
	VAK-1-191010-06	0,770	0,460	126	2,200	14,000	30,000
	VAK-1-191010-14	0,840	0,480	147	2,500	14,000	32,000
	VAK-1-191010-22	0,700	0,350	160	2,900	6,700	18,000
	VAK-1-191011-06	0,620	0,490	81	2,000	7,600	27,000
VAK-1-191011-14	0,700	0,380	143	2,500	16,000	26,000	
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	0,880	0,300	0,240	3,200	1,000	0,790
	VAK-2-191009-06	0,810	0,320	0,100	2,900	1,500	0,570
	VAK-2-191009-14	0,870	0,340	0,290	2,700	0,510	0,660
	VAK-2-191009-22	0,970	0,300	0,230	3,300	0,360	0,740
	VAK-2-191010-06	0,890	0,320	0,190	2,800	0,630	0,730
	VAK-2-191010-14	0,890	0,300	0,260	2,500	0,600	0,650
	VAK-2-191010-22	0,960	0,300	0,280	3,300	0,390	0,730
	VAK-2-191011-06	0,880	0,320	0,310	2,500	0,380	0,700
	VAK-2-191011-14	0,830	0,300	0,230	2,800	0,540	0,610
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	0,880	0,320	< 0,02	3,400	1,700	0,790
	VAK-3-191009-06	0,970	0,370	< 0,02	3,500	2,300	0,780
	VAK-3-191009-14	0,950	0,270	< 0,02	2,800	1,000	0,840
	VAK-3-191009-22	0,960	0,300	< 0,02	3,200	0,730	0,610
	VAK-3-191010-06	0,970	0,340	< 0,02	3,000	1,100	0,680
	VAK-3-191010-14	0,940	0,390	0	2,900	0,910	0,940
	VAK-3-191010-22	0,960	0,280	< 0,02	3,000	0,670	0,660
	VAK-3-191011-06	0,770	0,270	< 0,02	2,500	0,460	0,820
	VAK-3-191011-14	0,910	0,280	< 0,02	2,600	0,750	0,540
Ablauf	VAK-4-191008-22	0,800	0,160	< 0,02	2,700	1,100	< 0,05
	VAK-4-191009-06	0,920	0,130	< 0,02	2,900	1,100	< 0,05
	VAK-4-191009-14	0,860	0,150	< 0,02	2,600	1,100	< 0,05
	VAK-4-191009-22	0,820	0,140	< 0,02	2,500	0,880	< 0,05
	VAK-4-191010-06	0,940	0,140	< 0,02	2,800	1,300	< 0,05
	VAK-4-191010-14	0,810	0,130	< 0,02	2,300	1,000	< 0,05
	VAK-4-191010-22	0,820	0,140	< 0,02	2,200	0,840	< 0,05
	VAK-4-191011-06	0,800	0,130	< 0,02	2,500	0,590	< 0,05
	VAK-4-191011-14	0,760	0,140	< 0,02	2,200	1,000	< 0,05

Typ		ARZNEISTOFFE						
		<i>Iopamidol</i>	<i>Metformin</i>	<i>Metoprolol</i>	<i>Oxytetracyclin</i>	<i>Sulfamethoxazol</i>	<i>Trimethoprim</i>	
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Zulauf	ID-ges	VAK-1-191008-22	< 0,04	188	7,200	< 0,02	1,200	0,180
		VAK-1-191009-06	< 0,04	164	7,500	< 0,02	1,800	0,340
		VAK-1-191009-14	< 0,04	203	8,400	< 0,02	1,600	0,490
		VAK-1-191009-22	< 0,04	226	7,400	< 0,02	0,870	0,200
		VAK-1-191010-06	< 0,04	153	7,200	< 0,02	1,700	0,410
		VAK-1-191010-14	< 0,04	219	9,400	< 0,02	1,700	0,490
		VAK-1-191010-22	< 0,04	154	6,800	< 0,02	1,200	0,290
		VAK-1-191011-06	< 0,04	146	7,000	< 0,02	0,720	0,220
		VAK-1-191011-14	< 0,04	214	8,300	< 0,02	1,400	0,460
Belebtschlamm		VAK-2-191008-22	< 0,04	0,150	3,100	< 0,02	0,040	0,160
		VAK-2-191009-06	< 0,04	0,150	2,900	< 0,02	0,070	0,160
		VAK-2-191009-14	< 0,04	0,140	2,300	< 0,02	0,070	0,210
		VAK-2-191009-22	< 0,04	0,130	1,900	< 0,02	0,130	0,190
		VAK-2-191010-06	< 0,04	0,150	1,900	< 0,02	0,070	0,200
		VAK-2-191010-14	< 0,04	0,120	2,200	< 0,02	0,090	0,230
		VAK-2-191010-22	< 0,04	0,150	2,000	< 0,02	0,110	0,260
		VAK-2-191011-06	< 0,04	0,130	1,900	< 0,02	0,100	0,230
	VAK-2-191011-14	< 0,04	0,130	1,900	< 0,02	0,080	0,240	
Überschussschlamm		VAK-3-191008-22	< 0,04	0,170	3,200	< 0,02	0,040	0,150
		VAK-3-191009-06	< 0,04	0,200	3,000	< 0,02	< 0,02	0,140
		VAK-3-191009-14	< 0,04	0,210	2,500	< 0,02	< 0,02	0,180
		VAK-3-191009-22	< 0,04	0,200	2,100	< 0,02	0,090	0,200
		VAK-3-191010-06	< 0,04	0,180	2,100	< 0,02	< 0,02	0,190
		VAK-3-191010-14	< 0,04	0,180	2,000	< 0,02	0,090	0,230
		VAK-3-191010-22	< 0,04	0,190	2,400	< 0,02	< 0,02	0,260
		VAK-3-191011-06	< 0,04	0,190	1,800	< 0,02	< 0,02	0,210
		VAK-3-191011-14	< 0,04	0,120	1,900	< 0,02	0,140	0,230
Ablauf		VAK-4-191008-22	< 0,04	0,320	3,000	< 0,02	0,440	0,190
		VAK-4-191009-06	< 0,04	0,230	2,300	< 0,02	0,310	0,200
		VAK-4-191009-14	< 0,04	0,290	2,400	< 0,02	0,480	0,220
		VAK-4-191009-22	< 0,04	0,360	2,100	< 0,02	0,490	0,240
		VAK-4-191010-06	< 0,04	0,270	2,300	< 0,02	0,430	0,250
		VAK-4-191010-14	< 0,04	0,200	2,000	< 0,02	0,440	0,240
		VAK-4-191010-22	< 0,04	0,330	2,400	< 0,02	0,480	0,280
		VAK-4-191011-06	< 0,04	0,280	1,900	< 0,02	0,380	0,250
		VAK-4-191011-14	< 0,04	0,290	2,000	< 0,02	0,500	0,240

Typ		PFLANZENSCHUTZMITTEL						
		<i>Aclonifen</i>	<i>Bifenox</i>	<i>Cybutryn (Irgarol)</i>	<i>Cypermethrin</i>	<i>Dichlorvos</i>	<i>Dicofol</i>	<i>Diuron</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191008-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191009-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191009-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191009-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191010-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191010-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191010-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191011-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
VAK-1-191011-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02	
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191009-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191009-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191009-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191010-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191010-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191010-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191011-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191011-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191009-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191009-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191009-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191010-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191010-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191010-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191011-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191011-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Ablauf	VAK-4-191008-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191009-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191009-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191009-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191010-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191010-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191010-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191011-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191011-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02

Typ		PFLANZENSCHUTZMITTEL						
		<i>Glyphosat</i>	<i>Imidacloprid</i>	<i>Isoproturon</i>	<i>Quinoxifen</i>	<i>Terbuthylazin</i>	<i>Terbutryn</i>	<i>Triclosan</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191008-22	0,910	0,110	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191009-06	3,740	0,070	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191009-14	5,320	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191009-22	10,700	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,060
	VAK-1-191010-06	1,790	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191010-14	1,470	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191010-22	3,430	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,020	0,060
	VAK-1-191011-06	1,890	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
VAK-1-191011-14	27,000	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,020	< 0,05	
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	7,970	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,080	0,100
	VAK-2-191009-06	3,720	0,060	0,030	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-2-191009-14	12,100	0,060	0,020	< 0,02	< 0,02	0,070	0,080
	VAK-2-191009-22	1,810	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,050	0,090
	VAK-2-191010-06	7,180	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,090
	VAK-2-191010-14	14,700	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,090
	VAK-2-191010-22	1,880	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	0,110
	VAK-2-191011-06	14,000	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,060
VAK-2-191011-14	27,100	0,030	0,030	< 0,02	< 0,02	0,050	0,100	
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	0,230	0,050	0,030	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191009-06	1,350	0,070	0,020	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191009-14	1,210	0,060	0,020	< 0,02	< 0,02	0,050	< 0,05
	VAK-3-191009-22	19,900	0,060	0,020	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191010-06	1,680	0,060	0,030	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191010-14	0,700	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,070
	VAK-3-191010-22	15,300	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191011-06	2,190	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
	VAK-3-191011-14	0,890	0,030	0,020	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
Ablauf	VAK-4-191008-22	1,740	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191009-06	3,570	0,070	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191009-14	2,780	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191009-22	2,670	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191010-06	2,470	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191010-14	3,080	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191010-22	2,830	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191011-06	1,720	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191011-14	2,610	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05

Typ		PAKs							
		<i>Acenaphthen</i>	<i>Acenaphthylen</i>	<i>Anthracen</i>	<i>Benzo[a]anthracen</i>	<i>Benzo[a]pyren</i>	<i>Benzo[b]fluoranthen</i>	<i>Benzo[ghi]perylene</i>	<i>Benzo[k]fluoranthen</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges								
	VAK-1-191008-22	0,010	0,010	0,010	0,020	0,010	< 0,01	0,010	< 0,01
	VAK-1-191009-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191009-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191009-22	< 0,01	0,020	0,010	0,010	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191010-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191010-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191010-22	< 0,01	0,020	0,020	0,030	0,020	0,020	0,020	< 0,01
	VAK-1-191011-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
VAK-1-191011-14	< 0,01	0,020	< 0,01	0,010	0,030	0,020	0,020	0,010	
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	0,040	0,020	0,040	0,010
	VAK-2-191009-06	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	0,010	< 0,01
	VAK-2-191009-14	0,020	< 0,01	0,030	0,020	0,030	0,030	0,020	0,010
	VAK-2-191009-22	0,020	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	0,040	0,040	0,020
	VAK-2-191010-06	0,020	< 0,01	0,010	0,020	0,020	0,030	0,030	0,010
	VAK-2-191010-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-2-191010-22	0,020	< 0,01	0,020	0,020	0,020	0,010	0,020	< 0,01
	VAK-2-191011-06	0,050	0,040	0,100	0,190	0,050	0,060	0,050	0,030
VAK-2-191011-14	0,040	0,030	0,080	0,050	0,040	0,040	0,040	0,020	
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,010
	VAK-3-191009-06	0,010	0,030	< 0,01	0,020	0,020	0,020	0,030	< 0,01
	VAK-3-191009-14	0,030	0,030	0,050	0,030	0,030	0,030	0,030	0,010
	VAK-3-191009-22	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	< 0,01
	VAK-3-191010-06	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,010
	VAK-3-191010-14	0,030	< 0,01	0,060	0,030	0,030	0,030	0,030	0,020
	VAK-3-191010-22	0,020	0,020	0,030	0,030	0,040	0,040	0,040	0,020
	VAK-3-191011-06	0,040	0,020	0,070	0,040	0,040	0,040	0,040	0,020
	VAK-3-191011-14	0,020	< 0,01	0,030	0,020	0,040	0,040	0,040	0,020
Ablauf	VAK-4-191008-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191009-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191009-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191009-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191010-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191010-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191010-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191011-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191011-14	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Typ	ID-ges	PAKs							
		Chrysen	Dibenzo[ah]anthracen	Fluoranthren	Fluoren	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Naphthalin	Phenanthren	Pyren
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	VAK-1-191008-22	0,030	< 0,01	0,080	0,020	< 0,01	0,120	0,180	0,080
	VAK-1-191009-06	0,040	< 0,01	0,050	0,010	< 0,01	0,080	0,140	0,060
	VAK-1-191009-14	0,050	< 0,01	0,060	0,010	< 0,01	0,040	0,120	0,060
	VAK-1-191009-22	0,020	< 0,01	0,070	0,020	< 0,01	0,360	0,190	0,060
	VAK-1-191010-06	0,040	< 0,01	0,050	0,010	< 0,01	0,050	0,140	0,050
	VAK-1-191010-14	0,030	< 0,01	0,030	0,010	< 0,01	0,030	0,090	0,030
	VAK-1-191010-22	0,040	0,010	0,110	0,020	< 0,01	0,090	0,180	0,110
	VAK-1-191011-06	0,040	< 0,01	0,050	0,010	< 0,01	0,080	0,130	0,050
Belebtschlamm	VAK-1-191011-14	0,030	< 0,01	0,090	0,010	< 0,01	0,050	0,130	0,080
	VAK-2-191008-22	0,020	< 0,01	0,050	< 0,01	0,040	0,020	0,100	0,040
	VAK-2-191009-06	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	0,010	0,110	0,020
	VAK-2-191009-14	0,030	< 0,01	0,180	0,060	0,010	0,120	0,400	0,150
	VAK-2-191009-22	0,040	< 0,01	0,100	0,020	< 0,01	0,190	0,400	0,070
	VAK-2-191010-06	0,030	< 0,01	0,140	0,040	0,020	0,080	0,280	0,160
	VAK-2-191010-14	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,040	0,070	< 0,01
	VAK-2-191010-22	0,030	< 0,01	0,220	0,050	0,010	0,110	0,330	0,410
Überschussschlamm	VAK-2-191011-06	0,080	< 0,01	0,620	0,190	0,040	0,860	1,200	0,560
	VAK-2-191011-14	0,060	< 0,01	0,550	0,140	0,020	0,590	0,940	0,640
	VAK-3-191008-22	0,030	< 0,01	0,210	0,060	< 0,01	0,110	0,440	0,290
	VAK-3-191009-06	0,030	< 0,01	0,140	0,030	< 0,01	0,040	0,280	0,270
	VAK-3-191009-14	0,060	< 0,01	0,370	0,100	0,010	0,170	0,730	0,470
	VAK-3-191009-22	0,030	0,020	0,140	0,040	< 0,01	0,070	0,340	0,180
	VAK-3-191010-06	0,040	< 0,01	0,180	0,050	0,010	0,090	0,400	0,190
	VAK-3-191010-14	0,030	< 0,01	0,350	0,100	0,020	0,190	0,710	0,390
Ablauf	VAK-3-191010-22	0,040	< 0,01	0,240	0,050	0,010	0,110	0,460	0,310
	VAK-3-191011-06	0,070	< 0,01	0,420	0,120	0,050	0,240	0,900	0,510
	VAK-3-191011-14	0,040	< 0,01	0,310	0,070	0,020	0,190	0,560	0,400
	VAK-4-191008-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191009-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
	VAK-4-191009-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191009-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,020	< 0,01
	VAK-4-191010-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01
VAK-4-191010-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	
VAK-4-191010-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	
VAK-4-191011-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	
VAK-4-191011-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,030	0,020	< 0,01	

Typ	ID-ges	SONSTIGE			
		<i>Acesulfam-K</i>	<i>Bisphenol A</i>	<i>Benzotriazol</i>	<i>PFOS</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	VAK-1-191008-22	46,000	0,830	21,000	< 0,05
	VAK-1-191009-06	55,000	0,510	22,000	< 0,05
	VAK-1-191009-14	53,000	3,100	14,000	< 0,05
	VAK-1-191009-22	50,000	0,680	22,000	< 0,05
	VAK-1-191010-06	56,000	0,520	24,000	< 0,05
	VAK-1-191010-14	65,000	0,370	15,000	< 0,05
	VAK-1-191010-22	32,000	0,580	14,000	< 0,05
	VAK-1-191011-06	54,000	0,540	23,000	< 0,05
	VAK-1-191011-14	58,000	0,450	15,000	< 0,05
Belebtschlamm	VAK-2-191008-22	< 0,05	0,060	17,000	< 0,05
	VAK-2-191009-06	< 0,05	0,080	12,000	< 0,05
	VAK-2-191009-14	< 0,05	0,100	16,000	< 0,05
	VAK-2-191009-22	< 0,05	0,100	15,000	< 0,05
	VAK-2-191010-06	< 0,05	0,090	18,000	< 0,05
	VAK-2-191010-14	< 0,05	< 0,05	15,000	< 0,05
	VAK-2-191010-22	< 0,05	0,130	14,000	< 0,05
	VAK-2-191011-06	< 0,05	0,090	15,000	< 0,05
	VAK-2-191011-14	< 0,05	0,110	16,000	< 0,05
Überschussschlamm	VAK-3-191008-22	< 0,05	0,080	13,000	< 0,05
	VAK-3-191009-06	< 0,05	0,110	16,000	< 0,05
	VAK-3-191009-14	< 0,05	0,100	16,000	< 0,05
	VAK-3-191009-22	< 0,05	0,060	12,000	< 0,05
	VAK-3-191010-06	< 0,05	0,090	16,000	< 0,05
	VAK-3-191010-14	< 0,05	0,140	22,000	< 0,05
	VAK-3-191010-22	< 0,05	0,090	12,000	< 0,05
	VAK-3-191011-06	< 0,05	0,130	14,000	< 0,05
	VAK-3-191011-14	< 0,05	0,100	10,000	< 0,05
Ablauf	VAK-4-191008-22	0,110	< 0,05	9,400	< 0,05
	VAK-4-191009-06	0,140	< 0,05	8,600	< 0,05
	VAK-4-191009-14	0,170	< 0,05	8,200	< 0,05
	VAK-4-191009-22	0,150	< 0,05	7,200	< 0,05
	VAK-4-191010-06	0,120	< 0,05	8,400	< 0,05
	VAK-4-191010-14	0,110	< 0,05	7,600	< 0,05
	VAK-4-191010-22	0,090	< 0,05	7,300	< 0,05
	VAK-4-191011-06	0,110	< 0,05	8,800	< 0,05
	VAK-4-191011-14	0,120	< 0,05	7,600	< 0,05

## 2. Messwoche

Typ		BEGLEITPARAMETER								
		Q <sub>h</sub>	pH	LF	Redox	O <sub>2</sub>	T	TS	SV	ISV
		[m <sup>3</sup> /h]	[-]	[μS/cm]	[mV]	[mg/l]	[°C]	[g/l]	[mL/L]	[mL/g]
Zulauf	VAK-1-191015-22	1,121	7,88	1488	87,2	1,02	15,5	0,31	n.s.	n.s.
	VAK-1-191016-06	1,109	7,88	1485	121,5	5,32	16,4	0,29	n.s.	n.s.
	VAK-1-191016-14	1,092	7,96	870	132,5	3,09	15,6	0,19	n.s.	n.s.
	VAK-1-191016-22	1,238	7,87	1242	116,6	0,62	14,2	0,29	n.s.	n.s.
	VAK-1-191017-06	1,214	7,96	1396	118,9	0,17	13,2	0,26	n.s.	n.s.
	VAK-1-191017-14	1,233	8,12	1316	80,3	0,52	14,0	0,13	n.s.	n.s.
	VAK-1-191017-22	1,239	7,84	1364	86,1	0,61	13,1	0,22	n.s.	n.s.
	VAK-1-191018-06	1,152	7,91	1457	181,7	0,37	12,9	0,02	n.s.	n.s.
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	6,228	7,41	1037	144,5	0,17	15,0	3,09	780	252
	VAK-2-191016-06	6,092	7,45	1048	194,3	0,39	14,2	4,07	540	133
	VAK-2-191016-14	6,011	7,38	970	162,5	0,23	14,1	3,90	540	138
	VAK-2-191016-22	6,154	7,22	920	198,5	0,40	18,3	3,39	540	159
	VAK-2-191017-06	6,110	7,35	932	205,0	0,15	13,1	3,85	540	140
	VAK-2-191017-14	6,115	7,30	938	148,7	0,10	13,9	3,63	570	157
	VAK-2-191017-22	6,147	7,33	948	170,9	0,12	13,4	3,63	480	132
	VAK-2-191018-06	6,034	7,33	968	150,3	0,08	13,4	3,08	500	162
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	0,026	7,42	1044	118,6	0,08	14,7	4,94	570	115
	VAK-3-191016-06	0,026	7,47	1039	193,0	0,09	13,5	5,71	720	126
	VAK-3-191016-14	0,026	7,45	1000	160,9	0,11	13,1	5,68	800	141
	VAK-3-191016-22	0,028	7,40	893	191,0	0,10	13,6	5,23	920	176
	VAK-3-191017-06	0,026	7,38	912	227,0	0,09	12,2	5,52	760	138
	VAK-3-191017-14	0,026	7,35	914	155,1	0,06	13,2	5,22	840	161
	VAK-3-191017-22	0,025	7,37	938	169,1	0,08	13,3	5,48	720	131
	VAK-3-191018-06	0,026	7,40	957	150,3	0,07	12,8	5,38	600	111
Ablauf	VAK-4-191015-22	1,095	7,69	1064	233,0	5,94	20,7	0,03	n.s.	n.s.
	VAK-4-191016-06	1,083	7,77	1049	250,0	4,57	20,6	0,07	n.s.	n.s.
	VAK-4-191016-14	1,066	7,74	1001	188,3	5,56	19,2	0,03	n.s.	n.s.
	VAK-4-191016-22	1,209	7,68	913	260,0	6,42	19,2	0,02	n.s.	n.s.
	VAK-4-191017-06	1,188	7,61	922	296,0	4,93	18,8	0,10	n.s.	n.s.
	VAK-4-191017-14	1,207	7,25	967	300,0	5,21	18,8	0,02	n.s.	n.s.
	VAK-4-191017-22	1,214	7,59	963	234,0	6,04	19,0	0,06	n.s.	n.s.
	VAK-4-191018-06	1,126	7,58	970	199,2	4,38	18,9	0,01	n.s.	n.s.
VAK-4-191018-14	1,204	7,60	985	239,0	6,04	19,2	0,02	n.s.	n.s.	

Typ		BEGLEITPARAMETER						
		CSB	BSB <sub>5</sub>	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191015-22	637,0	500,0	80,3	54,6	0,1	0,8	9,0
	VAK-1-191016-06	644,0	360,0	92,0	63,1	0,0	0,6	9,4
	VAK-1-191016-14	492,0	380,0	56,2	36,0	0,0	0,7	7,4
	VAK-1-191016-22	562,0	340,0	64,5	47,0	0,0	0,6	8,1
	VAK-1-191017-06	411,0	360,0	79,3	57,5	0,0	0,5	7,5
	VAK-1-191017-14	451,0	400,0	84,0	58,7	0,0	0,6	9,2
	VAK-1-191017-22	558,0	380,0	72,7	52,8	0,0	0,6	8,5
	VAK-1-191018-06	536,0	300,0	91,6	62,6	0,0	0,7	9,1
Belebtschlamm	VAK-1-191018-14	536,0	400,0	80,7	60,9	0,0	0,7	9,2
	VAK-2-191015-22	43,7	n.s.	10,9	2,1	0,1	6,6	6,5
	VAK-2-191016-06	45,8	n.s.	10,0	0,3	0,1	6,9	6,5
	VAK-2-191016-14	102,0	n.s.	11,7	0,2	0,1	9,5	6,0
	VAK-2-191016-22	44,0	n.s.	14,1	0,1	0,1	10,5	5,2
	VAK-2-191017-06	29,6	n.s.	11,3	0,2	0,0	7,7	6,1
	VAK-2-191017-14	30,8	n.s.	15,2	0,4	0,0	11,8	6,0
	VAK-2-191017-22	31,3	n.s.	12,7	0,2	0,1	10,7	5,5
	VAK-2-191018-06	33,2	n.s.	11,7	0,3	0,1	8,1	6,2
Überschussschlamm	VAK-2-191018-14	49,0	n.s.	13,8	0,7	0,1	11,6	6,0
	VAK-3-191015-22	67,8	n.s.	10,4	5,9	0,0	0,5	8,8
	VAK-3-191016-06	55,4	n.s.	5,5	0,7	0,0	0,6	8,8
	VAK-3-191016-14	115,0	n.s.	6,0	0,9	0,1	1,4	7,3
	VAK-3-191016-22	43,8	n.s.	4,9	0,8	0,1	1,8	6,7
	VAK-3-191017-06	68,8	n.s.	6,2	0,8	0,0	0,6	7,9
	VAK-3-191017-14	44,9	n.s.	7,6	0,8	0,1	3,1	7,3
	VAK-3-191017-22	36,0	n.s.	6,3	0,9	0,1	3,2	6,5
	VAK-3-191018-06	31,1	n.s.	6,9	0,8	0,1	1,3	7,6
Ablauf	VAK-3-191018-14	51,1	n.s.	7,2	0,9	0,1	4,3	5,4
	VAK-4-191015-22	57,9	n.s.	16,2	3,9	0,2	8,6	5,6
	VAK-4-191016-06	36,6	n.s.	14,9	0,0	0,0	11,1	5,3
	VAK-4-191016-14	74,6	n.s.	14,7	0,0	0,0	13,4	5,2
	VAK-4-191016-22	40,2	n.s.	14,8	0,0	0,0	12,8	5,0
	VAK-4-191017-06	34,4	n.s.	13,8	0,1	0,0	11,1	5,0
	VAK-4-191017-14	28,9	n.s.	17,2	0,1	0,0	14,4	5,3
	VAK-4-191017-22	78,3	n.s.	18,6	0,2	0,1	15,6	5,5
	VAK-4-191018-06	124,0	n.s.	16,8	0,1	0,1	12,9	5,4
VAK-4-191018-14	50,0	n.s.	17,8	0,4	0,1	14,6	6,7	

Typ		SCHWERMETALLE			
		<i>Blei (Pb)</i>	<i>Cadmium (Cd)</i>	<i>Nickel (Ni)</i>	<i>Quecksilber (Hg)</i>
		[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	ID-ges				
	VAK-1-191015-22	0,009	< 0,001	0,010	0,000
	VAK-1-191016-06	0,005	< 0,001	0,011	0,000
	VAK-1-191016-14	0,007	< 0,001	0,008	0,001
	VAK-1-191016-22	0,007	< 0,001	0,008	< 0,0001
	VAK-1-191017-06	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
	VAK-1-191017-14	< 0,005	< 0,001	0,007	0,000
	VAK-1-191017-22	0,005	< 0,001	0,010	< 0,0001
	VAK-1-191018-06	< 0,005	< 0,001	0,014	< 0,0001
VAK-1-191018-14	< 0,005	< 0,001	0,010	< 0,0001	
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	0,061	0,002	0,050	0,000
	VAK-2-191016-06	0,062	0,002	0,054	0,001
	VAK-2-191016-14	0,060	0,002	0,049	0,002
	VAK-2-191016-22	0,062	0,002	0,063	0,001
	VAK-2-191017-06	0,060	0,002	0,047	0,002
	VAK-2-191017-14	0,065	0,002	0,051	0,001
	VAK-2-191017-22	0,068	0,002	0,049	0,001
	VAK-2-191018-06	0,072	0,002	0,048	0,001
VAK-2-191018-14	0,071	0,002	0,046	0,002	
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	0,078	0,002	0,063	0,003
	VAK-3-191016-06	0,086	0,003	0,069	0,002
	VAK-3-191016-14	0,084	0,003	0,070	0,002
	VAK-3-191016-22	0,085	0,003	0,068	0,003
	VAK-3-191017-06	0,082	0,002	0,064	0,002
	VAK-3-191017-14	0,085	0,002	0,065	0,004
	VAK-3-191017-22	0,101	0,003	0,066	0,001
	VAK-3-191018-06	0,100	0,003	0,071	0,001
	VAK-3-191018-14	0,095	0,003	0,063	0,001
Ablauf	VAK-4-191015-22	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
	VAK-4-191016-06	< 0,005	< 0,001	0,007	< 0,0001
	VAK-4-191016-14	< 0,005	< 0,001	0,007	< 0,0001
	VAK-4-191016-22	< 0,005	< 0,001	0,007	< 0,0001
	VAK-4-191017-06	< 0,005	< 0,001	0,003	< 0,0001
	VAK-4-191017-14	< 0,005	< 0,001	0,005	< 0,0001
	VAK-4-191017-22	< 0,005	< 0,001	0,007	< 0,0001
	VAK-4-191018-06	< 0,005	< 0,001	0,003	< 0,0001
	VAK-4-191018-14	< 0,005	< 0,001	0,013	< 0,0001

Typ		ARZNEISTOFFE					
		<i>Carbamazepin</i>	<i>Ciprofloxacin</i>	<i>Coffein</i>	<i>Diclofenac</i>	<i>Gabapentin</i>	<i>Ibuprofen</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges						
	VAK-1-191015-22	0,680	0,670	163	3,300	16,000	25,000
	VAK-1-191016-06	0,740	0,730	111	2,700	13,000	27,000
	VAK-1-191016-14	0,540	0,290	75	2,100	12,000	16,000
	VAK-1-191016-22	0,650	0,350	123	4,200	11,000	19,000
	VAK-1-191017-06	0,490	0,590	91	2,100	11,000	23,000
	VAK-1-191017-14	0,690	0,890	119	2,700	13,000	21,000
	VAK-1-191017-22	0,770	0,470	101	2,600	14,000	21,000
	VAK-1-191018-06	0,600	0,110	103	3,200	10,000	21,000
Belebtschlamm	VAK-1-191018-14	0,690	0,900	121	3,300	19,000	22,000
	VAK-2-191015-22	0,840	0,420	0,260	3,700	0,860	0,500
	VAK-2-191016-06	0,870	0,470	0,270	3,100	0,850	0,310
	VAK-2-191016-14	0,880	0,450	0,370	3,300	0,600	0,480
	VAK-2-191016-22	0,810	0,380	0,370	3,300	1,300	0,420
	VAK-2-191017-06	0,750	0,350	0,170	3,300	0,580	0,380
	VAK-2-191017-14	0,650	0,340	0,160	2,500	0,680	0,380
	VAK-2-191017-22	0,700	0,330	0,210	2,400	0,850	0,390
	VAK-2-191018-06	0,720	0,330	0,220	2,700	0,670	0,320
Überschussschlamm	VAK-2-191018-14	0,710	0,310	0,190	2,900	0,820	0,290
	VAK-3-191015-22	0,990	0,440	0,030	3,900	1,200	0,440
	VAK-3-191016-06	0,980	0,440	0,060	3,800	1,500	0,650
	VAK-3-191016-14	0,950	0,410	0,150	3,100	0,670	0,550
	VAK-3-191016-22	0,950	0,330	0,190	3,100	0,760	0,600
	VAK-3-191017-06	0,790	0,390	0,270	3,300	0,700	0,300
	VAK-3-191017-14	0,770	0,380	0,290	2,800	0,890	0,700
	VAK-3-191017-22	0,690	0,360	0,160	2,700	0,920	0,490
	VAK-3-191018-06	0,750	0,370	0,220	2,800	0,930	0,350
Ablauf	VAK-3-191018-14	0,720	0,340	0,220	2,900	0,740	0,350
	VAK-4-191015-22	0,820	0,210	0,120	2,800	1,200	< 0,05
	VAK-4-191016-06	0,770	0,210	0,150	2,900	1,300	< 0,05
	VAK-4-191016-14	0,860	0,220	0,060	2,700	0,940	< 0,05
	VAK-4-191016-22	0,730	0,180	0,070	2,400	1,100	< 0,05
	VAK-4-191017-06	0,700	0,160	0,180	2,600	0,940	< 0,05
	VAK-4-191017-14	0,660	0,180	0,160	2,500	1,100	< 0,05
	VAK-4-191017-22	0,620	0,170	0,120	2,200	1,200	0,260
	VAK-4-191018-06	0,650	0,170	0,080	2,300	1,200	0,200
VAK-4-191018-14	0,700	0,180	0,060	2,500	1,300	0,100	

Typ		ARZNEISTOFFE						
		<i>Iopamidol</i>	<i>Metformin</i>	<i>Metoprolol</i>	<i>Oxytetracyclin</i>	<i>Sulfamethoxazol</i>	<i>Trimethoprim</i>	
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Zulauf	ID-ges	VAK-1-191015-22	< 0,04	271	9,500	< 0,02	1,300	0,350
		VAK-1-191016-06	< 0,04	226	9,600	< 0,02	1,300	0,340
		VAK-1-191016-14	< 0,04	163	6,900	< 0,02	1,200	0,250
		VAK-1-191016-22	0,430	208	7,100	< 0,02	1,100	0,330
		VAK-1-191017-06	0,040	166	7,900	< 0,02	1,300	0,370
		VAK-1-191017-14	< 0,04	140	9,300	< 0,02	1,700	0,570
		VAK-1-191017-22	< 0,04	215	7,300	< 0,02	1,600	0,520
		VAK-1-191018-06	1,000	166	8,400	< 0,02	1,000	0,240
		VAK-1-191018-14	0,550	221	9,900	< 0,02	1,500	0,430
Belebtschlamm		VAK-2-191015-22	< 0,04	0,150	2,900	< 0,02	0,100	0,270
		VAK-2-191016-06	< 0,04	0,140	2,300	< 0,02	0,170	0,230
		VAK-2-191016-14	< 0,04	0,140	1,600	< 0,02	0,210	0,270
		VAK-2-191016-22	0,130	0,150	1,900	< 0,02	0,190	0,230
		VAK-2-191017-06	0,120	0,130	1,600	< 0,02	0,130	0,250
		VAK-2-191017-14	0,100	0,150	1,800	< 0,02	0,180	0,260
		VAK-2-191017-22	0,110	0,250	2,000	< 0,02	0,190	0,540
		VAK-2-191018-06	0,220	0,260	2,000	< 0,02	0,140	1,370
	VAK-2-191018-14	0,480	0,250	2,300	< 0,02	0,180	0,720	
Überschussschlamm		VAK-3-191015-22	< 0,04	0,170	4,000	< 0,02	0,140	0,320
		VAK-3-191016-06	< 0,04	0,190	3,000	< 0,02	0,110	0,310
		VAK-3-191016-14	< 0,04	0,170	2,100	< 0,02	0,100	0,280
		VAK-3-191016-22	0,060	0,200	1,500	< 0,02	0,110	0,240
		VAK-3-191017-06	0,120	0,200	1,900	< 0,02	0,120	0,260
		VAK-3-191017-14	0,080	0,230	2,000	< 0,02	0,080	0,280
		VAK-3-191017-22	0,120	0,340	2,200	< 0,02	0,130	0,950
		VAK-3-191018-06	0,170	0,340	2,300	< 0,02	0,120	0,810
		VAK-3-191018-14	0,420	0,290	2,300	< 0,02	0,100	0,950
Ablauf		VAK-4-191015-22	< 0,04	0,400	2,900	< 0,02	0,380	0,300
		VAK-4-191016-06	< 0,04	0,380	2,200	< 0,02	0,440	0,270
		VAK-4-191016-14	< 0,04	0,300	2,100	< 0,02	0,480	0,280
		VAK-4-191016-22	71,000	0,410	1,300	< 0,02	0,490	0,220
		VAK-4-191017-06	#####	0,430	1,800	< 0,02	0,470	0,230
		VAK-4-191017-14	0,090	0,480	2,200	< 0,02	0,540	0,250
		VAK-4-191017-22	0,080	0,840	2,200	< 0,02	0,700	0,290
		VAK-4-191018-06	0,130	0,690	2,300	< 0,02	0,670	0,300
		VAK-4-191018-14	0,360	0,740	2,600	< 0,02	0,460	0,290

Typ		PFLANZENSCHUTZMITTEL						
		<i>Aclonifen</i>	<i>Bifenox</i>	<i>Cybutryn (Irgarol)</i>	<i>Cypermethrin</i>	<i>Dichlorvos</i>	<i>Dicofol</i>	<i>Diuron</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191015-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191016-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191016-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191016-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191017-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191017-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191017-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	VAK-1-191018-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
VAK-1-191018-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02	
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191016-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191016-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191016-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191017-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191017-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191017-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-2-191018-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
VAK-2-191018-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02	
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191016-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191016-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191016-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191017-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191017-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191017-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191018-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-3-191018-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Ablauf	VAK-4-191015-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191016-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191016-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191016-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191017-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191017-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191017-22	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191018-06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	VAK-4-191018-14	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02

Typ		PFLANZENSCHUTZMITTEL						
		<i>Glyphosat</i>	<i>Imidacloprid</i>	<i>Isoproturon</i>	<i>Quinoxifen</i>	<i>Terbuthylazin</i>	<i>Terbutryn</i>	<i>Triclosan</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges							
	VAK-1-191015-22	5,370	0,060	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,060
	VAK-1-191016-06	3,500	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191016-14	3,800	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191016-22	#####	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191017-06	41,100	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191017-14	67,000	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191017-22	33,100	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-1-191018-06	12,300	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
VAK-1-191018-14	15,800	0,020	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	21,900	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,070	0,120
	VAK-2-191016-06	23,500	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	0,060
	VAK-2-191016-14	30,900	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	0,110
	VAK-2-191016-22	23,900	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,060
	VAK-2-191017-06	44,500	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	0,350
	VAK-2-191017-14	34,700	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
	VAK-2-191017-22	43,000	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-2-191018-06	40,900	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,020	< 0,05
VAK-2-191018-14	22,800	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	30,900	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
	VAK-3-191016-06	38,800	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
	VAK-3-191016-14	29,400	0,050	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191016-22	48,300	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191017-06	59,100	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191017-14	44,300	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,040	< 0,05
	VAK-3-191017-22	66,000	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-3-191018-06	90,400	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,030	< 0,05
	VAK-3-191018-14	41,600	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,020	< 0,05
Ablauf	VAK-4-191015-22	6,690	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191016-06	3,090	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191016-14	5,940	0,040	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191016-22	11,600	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191017-06	12,700	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191017-14	65,000	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191017-22	21,700	0,020	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191018-06	13,900	0,020	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	VAK-4-191018-14	13,500	0,030	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05

Typ		PAKs							
		<i>Acenaphthen</i>	<i>Acenaphthylen</i>	<i>Anthracen</i>	<i>Benzo[a]anthracen</i>	<i>Benzo[a]pyren</i>	<i>Benzo[b]fluoranthen</i>	<i>Benzo[ghi]perylene</i>	<i>Benzo[k]fluoranthen</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	ID-ges								
	VAK-1-191015-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191016-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191016-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191016-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191017-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191017-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191017-22	< 0,01	0,020	< 0,01	0,090	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-1-191018-06	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
VAK-1-191018-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-2-191016-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-2-191016-14	0,010	< 0,01	0,030	< 0,01	0,020	0,020	0,020	< 0,01
	VAK-2-191016-22	0,010	< 0,01	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010
	VAK-2-191017-06	0,010	< 0,01	0,030	0,010	0,020	0,020	0,010	< 0,01
	VAK-2-191017-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	< 0,01	< 0,01
	VAK-2-191017-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,030	0,020	0,010
	VAK-2-191018-06	0,030	< 0,01	0,040	0,020	0,020	0,020	0,020	0,010
VAK-2-191018-14	0,010	< 0,01	0,010	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010	
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	0,010	< 0,01	0,020	< 0,01	0,020	0,020	0,010	< 0,01
	VAK-3-191016-06	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	0,010	0,010	0,010	< 0,01
	VAK-3-191016-14	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	0,010	0,020	0,020	< 0,01
	VAK-3-191016-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	0,020	< 0,01	< 0,01
	VAK-3-191017-06	0,010	< 0,01	0,020	< 0,01	0,020	0,010	0,010	< 0,01
	VAK-3-191017-14	< 0,01	< 0,01	0,010	0,020	0,020	0,030	0,020	< 0,01
	VAK-3-191017-22	0,010	< 0,01	0,070	0,020	0,030	0,040	0,030	0,020
	VAK-3-191018-06	0,010	< 0,01	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010
	VAK-3-191018-14	0,020	< 0,01	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010
Ablauf	VAK-4-191015-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191016-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191016-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191016-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191017-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191017-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191017-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191018-06	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191018-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Typ	ID-ges	PAKs							
		Chrysen	Dibenzo[ah]anthracen	Fluoranthren	Fluoren	Indeno[1,2,3-cd]pyren	Naphthalin	Phenanthren	Pyren
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	VAK-1-191015-22	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	0,090	0,070	0,020
	VAK-1-191016-06	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,050	0,040	0,010
	VAK-1-191016-14	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,030	0,040	< 0,01
	VAK-1-191016-22	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01	0,050	0,060	0,020
	VAK-1-191017-06	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	0,040	0,040	0,010
	VAK-1-191017-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,050	0,040	< 0,01
	VAK-1-191017-22	0,020	< 0,01	0,070	0,010	< 0,01	0,190	0,140	0,060
	VAK-1-191018-06	0,010	< 0,01	0,050	0,010	< 0,01	0,550	0,110	0,040
	VAK-1-191018-14	< 0,01	< 0,01	0,050	< 0,01	< 0,01	0,360	0,090	0,040
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,020	< 0,01
	VAK-2-191016-06	< 0,01	< 0,01	0,070	0,020	< 0,01	0,030	0,130	0,100
	VAK-2-191016-14	0,020	< 0,01	0,210	0,050	0,010	0,070	0,360	0,350
	VAK-2-191016-22	0,030	< 0,01	0,140	0,040	0,010	0,080	0,290	0,140
	VAK-2-191017-06	0,030	< 0,01	0,190	0,050	0,020	0,040	0,360	0,150
	VAK-2-191017-14	0,010	< 0,01	0,030	< 0,01	< 0,01	0,020	0,080	0,030
	VAK-2-191017-22	0,020	< 0,01	0,090	0,020	0,010	0,050	0,200	0,070
	VAK-2-191018-06	0,030	< 0,01	0,210	0,080	0,010	0,200	0,520	0,160
VAK-2-191018-14	0,020	0,020	0,110	0,030	0,010	0,090	0,270	0,090	
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	0,020	< 0,01	0,090	0,030	< 0,01	0,060	0,230	0,070
	VAK-3-191016-06	0,010	< 0,01	0,070	0,020	< 0,01	0,050	0,220	0,060
	VAK-3-191016-14	0,020	0,010	0,100	0,020	< 0,01	0,040	0,230	0,110
	VAK-3-191016-22	0,010	< 0,01	0,050	0,010	< 0,01	0,040	0,150	0,040
	VAK-3-191017-06	0,010	< 0,01	0,110	0,030	< 0,01	0,060	0,280	0,090
	VAK-3-191017-14	0,010	0,010	0,100	0,020	< 0,01	0,070	0,240	0,080
	VAK-3-191017-22	0,040	< 0,01	0,130	0,030	0,020	0,050	0,350	0,110
	VAK-3-191018-06	0,020	< 0,01	0,140	0,040	< 0,01	0,080	0,310	0,110
VAK-3-191018-14	0,020	< 0,01	0,160	0,040	< 0,01	0,110	0,350	0,150	
Ablauf	VAK-4-191015-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	0,010	< 0,01
	VAK-4-191016-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
	VAK-4-191016-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191016-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	0,010	< 0,01
	VAK-4-191017-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191017-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191017-22	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01
	VAK-4-191018-06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,020	< 0,01	< 0,01
	VAK-4-191018-14	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,040	0,010	< 0,01

Typ	ID-ges	SONSTIGE			
		<i>Acesulfam-K</i>	<i>Bisphenol A</i>	<i>Benzotriazol</i>	<i>PFOS</i>
		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	VAK-1-191015-22	39,000	1,200	26,000	< 0,05
	VAK-1-191016-06	45,000	0,750	26,000	< 0,05
	VAK-1-191016-14	29,000	0,480	7,900	< 0,05
	VAK-1-191016-22	27,000	0,670	20,000	0,240
	VAK-1-191017-06	40,000	0,610	25,000	0,230
	VAK-1-191017-14	40,000	0,470	13,000	< 0,05
	VAK-1-191017-22	33,000	0,820	17,000	0,250
	VAK-1-191018-06	42,000	0,820	22,000	0,050
	VAK-1-191018-14	45,000	0,720	14,000	0,370
Belebtschlamm	VAK-2-191015-22	< 0,05	0,130	18,000	< 0,05
	VAK-2-191016-06	< 0,05	< 0,05	20,000	< 0,05
	VAK-2-191016-14	< 0,05	0,070	17,000	0,050
	VAK-2-191016-22	< 0,05	0,050	17,000	0,050
	VAK-2-191017-06	< 0,05	0,050	20,000	0,050
	VAK-2-191017-14	< 0,05	0,050	18,000	0,060
	VAK-2-191017-22	< 0,05	0,160	16,000	0,080
	VAK-2-191018-06	< 0,05	0,100	18,000	< 0,05
	VAK-2-191018-14	< 0,05	0,100	18,000	0,050
Überschussschlamm	VAK-3-191015-22	< 0,05	0,180	22,000	< 0,05
	VAK-3-191016-06	< 0,05	0,130	26,000	0,090
	VAK-3-191016-14	< 0,05	0,150	23,000	< 0,05
	VAK-3-191016-22	< 0,05	0,080	20,000	0,090
	VAK-3-191017-06	< 0,05	0,060	22,000	0,100
	VAK-3-191017-14	< 0,05	0,070	26,000	0,120
	VAK-3-191017-22	< 0,05	0,260	19,000	< 0,05
	VAK-3-191018-06	< 0,05	0,170	22,000	< 0,05
	VAK-3-191018-14	< 0,05	0,170	22,000	0,060
Ablauf	VAK-4-191015-22	0,070	< 0,05	8,800	< 0,05
	VAK-4-191016-06	0,090	< 0,05	10,000	< 0,05
	VAK-4-191016-14	0,060	< 0,05	8,700	< 0,05
	VAK-4-191016-22	0,070	< 0,05	6,400	0,200
	VAK-4-191017-06	0,130	< 0,05	8,600	0,170
	VAK-4-191017-14	0,140	< 0,05	9,300	0,210
	VAK-4-191017-22	0,200	< 0,05	8,400	< 0,05
	VAK-4-191018-06	0,150	< 0,05	7,400	< 0,05
	VAK-4-191018-14	0,270	< 0,05	8,100	0,090

## 1.2 Biodegradationskonstanten

Ermittelt nach Gleichung 1b, Abs, 2.1. Für fehlende Parameter liegen keine Daten vor.

$k_{\text{bio}}$ [L/(g TS * d)]	1. Messwoche					
Nickel (Ni)	0,78	2,55	0,99	0,26	2,88	0,00
Carbamazepin	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00
Ciprofloxacin	0,78	0,85	0,26	0,37	0,79	1,00
Coffein	1,85	1,63	4,12	4,70	3,27	4,30
Diclofenac	0,15	0,02	0,00	0,27	0,00	0,03
Gabapentin	1,02	1,02	0,78	0,68	0,72	0,84
Ibuprofen	1,45	1,39	1,37	0,78	0,88	1,08
Iopamidol	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00
Metformin	1,77	1,70	1,75	1,50	1,49	1,56
Metoprolol	0,90	0,72	0,44	0,46	0,47	0,49
Sulfamethoxazol	0,26	0,23	0,18	0,10	0,15	0,30
Trimethoprim	0,18	0,15	0,00	0,05	0,08	0,29
Glyphosat	0,00	0,00	0,00	1,73	1,14	0,54
Imidacloprid	0,30	0,12	0,00	0,15	0,18	0,00
Naphthalin	2,01	0,58	0,23	1,26	0,52	0,20
Phenanthren	8,92	8,66	0,40	5,23	0,39	0,28
Acesulfam-K	1,21	1,06	1,02	0,90	1,04	1,01
Benzotriazol	0,94	0,72	0,00	0,65	0,80	0,36
PFOS	0,00	0,00	0,00	0,78	0,86	0,00

$k_{\text{bio}}$ [L/(g TS * d)]	2. Messwoche					
Nickel (Ni)	6,25	21,61	0,00	12,27	19,88	16,60
Carbamazepin	0,24	0,00	0,07	0,00	0,00	0,13
Ciprofloxacin	3,88	3,40	3,66	4,14	4,52	4,98
Coffein						
Diclofenac	0,15	0,00	0,15	0,06	0,00	0,08
Gabapentin	3,91	2,94	5,44	7,17	5,84	5,06
Ibuprofen						
Iopamidol						
Metformin	42,37	44,05	50,75	51,14	42,90	56,84
Metoprolol	0,63	0,69	0,91	0,80	0,94	0,96
Sulfamethoxazol	22,41	20,45	18,44	4,59	21,40	13,64
Trimethoprim	7,66	4,95	2,44	6,84	3,30	2,26
Glyphosat	0,00	0,43	0,13	31,93	0,18	0,03
Imidacloprid	26,43	15,95	25,89	17,65	29,57	27,48
Naphthalin	28,98	65,48	8,93	1,43	10,25	30,44
Phenanthren	4,38	7,14	0,88	1,35	1,17	8,79
Acesulfam-K						
Benzotriazol	0,37	0,76	0,52	0,44	0,51	1,11
PFOS						

### 1.3 Sorptionskoeffizienten

Ermittelt nach Gleichung 5, Abs. 2.2. Für fehlende Parameter liegen keine Daten vor.

$k_d$ [L/kg TS]	1. Messwoche								
<b>Blei (Pb)</b>	> 3643	> 3446	> 3719	> 3712	> 3421	> 3794	> 3804	> 3579	> 3531
<b>Cadmium (Cd)</b>	> 515	> 355	> 521	> 493	> 349	> 542	> 496	> 475	> 490
<b>Nickel (Ni)</b>	2405	2167	2259	1736	2749	1513	2178	1900	2697
<b>Quecksilber (Hg)</b>	> 3780	> 3552	> 5213	> 3942	> 3666	> 3613	> 2977	> 3167	> 3106
<b>Carbamazepin</b>	189	187	192	192	180	210	194	152	196
<b>Ciprofloxacin</b>	344	506	313	352	424	542	331	329	327
<b>Coffein</b>									
<b>Diclofenac</b>	216	214	187	210	187	228	226	158	193
<b>Gabapentin</b>	266	371	158	136	148	164	132	123	123
<b>Ibuprofen</b>									
<b>Iopamidol</b>									
<b>Metformin</b>	91	154	126	91	116	163	95	107	68
<b>Metoprolol</b>	183	232	181	164	159	181	165	150	155
<b>Sulfamethoxazol</b>	16	3	2	30	2	37	2	2	46
<b>Trimethoprim</b>	136	124	142	137	133	173	154	133	157
<b>Glyphosat</b>	23	67	76	1224	119	41	894	202	56
<b>Imidacloprid</b>	215	178	174	164	175	181	165	95	123
<b>Isoproturon</b>	> 258	> 178	> 174	> 164	> 262	> 90	> 83	> 79	> 163
<b>Terbutryn</b>	> 258	> 266	> 434	> 246	> 262	> 361	> 248	> 317	> 245
<b>Acenaphthen</b>	> 344	> 178	> 521	> 329	> 349	> 542	> 331	> 633	> 327
<b>Acenaphthylen</b>	> 344	> 533	> 521	> 164	> 175	> 90	> 331	> 317	> 82
<b>Anthracen</b>	> 344	> 89	> 869	> 329	> 349	> 1084	> 496	> 1108	> 490
<b>Benzo[a]anthracen</b>	> 344	> 355	> 521	> 329	> 349	> 542	> 496	> 633	> 327
<b>Benzo[a]pyren</b>	> 344	> 355	> 521	> 329	> 349	> 542	> 662	> 633	> 654
<b>Benzo[b]fluoranthen</b>	> 344	> 355	> 521	> 329	> 349	> 542	> 662	> 633	> 654
<b>Benzo[ghi]perylen</b>	> 515	> 533	> 521	> 493	> 349	> 542	> 662	> 633	> 654
<b>Benzo[k]fluoranthen</b>	> 172	> 89	> 174	> 82	> 175	> 361	> 331	> 317	> 327
<b>Chrysen</b>	> 515	> 533	> 1043	> 493	> 698	> 542	> 662	> 1108	> 654
<b>Fluoranthen</b>	> 3608	> 2487	> 6429	> 2300	> 3142	> 6323	> 3970	> 6651	> 5068
<b>Fluoren</b>	> 1031	> 533	> 1738	> 657	> 873	> 1807	> 827	> 1900	> 1144
<b>Indeno[1,2,3-cd]pyren</b>	> 86	> 89	> 174	> 82	> 175	> 361	> 165	> 792	> 327
<b>Naphthalin</b>	630	355	985	575	785	1144	910	1900	1035
<b>Phenanthren</b>		4973		2792					4577
<b>Pyren</b>	> 4983	> 4796	> 8167	> 2957	> 3316	> 7046	> 5127	> 8076	> 6539
<b>Bisphenol A</b>	275	391	348	197	314	506	298	412	327
<b>Benzotriazol</b>	238	330	339	274	332	523	272	252	215
<b>PFOS</b>									

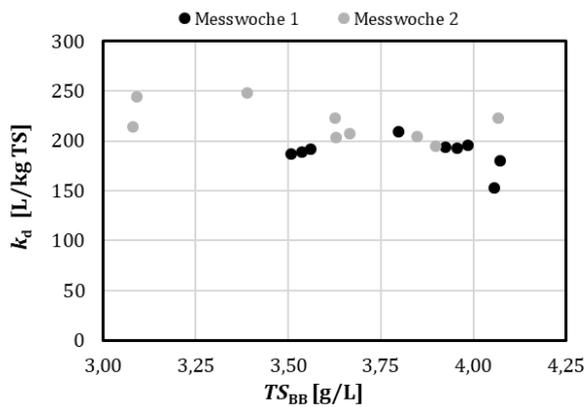
$k_d$ [L/kg TS]	2. Messwoche								
<b>Blei (Pb)</b>	> 3160	> 3014	> 2958	> 3248	> 2970	> 3255	> 3687	> 3715	> 3824
<b>Cadmium (Cd)</b>	> 405	> 526	> 528	> 573	> 362	> 383	> 548	> 557	> 604
<b>Nickel (Ni)</b>	2127	1727	1761	1856	3863	2489	1721	4397	975
<b>Quecksilber (Hg)</b>	> 5671	> 3329	> 3874	> 4968	> 3441	> 7276	> 1643	> 1672	> 2214
<b>Carbamazepin</b>	245	223	195	249	204	223	203	214	207
<b>Ciprofloxacin</b>	424	367	328	350	441	404	387	404	380
<b>Coffein</b>	51	70	440	519	272	347	243	511	738
<b>Diclofenac</b>	282	230	202	247	230	214	224	226	233
<b>Gabapentin</b>	203	202	126	132	135	155	140	144	115
<b>Ibuprofen</b>							344	325	704
<b>Iopamidol</b>						170	274	243	235
<b>Metformin</b>	86	88	100	93	84	92	74	92	79
<b>Metoprolol</b>	279	239	176	220	191	174	183	186	178
<b>Sulfamethoxazol</b>	75	44	37	43	46	28	34	33	44
<b>Trimethoprim</b>	216	201	176	208	205	214	598	502	659
<b>Glyphosat</b>	936	2200	872	796	843	130	555	1208	620
<b>Imidacloprid</b>	253	219	220	191	241	191	274	279	201
<b>Isoproturon</b>									
<b>Terbutryn</b>	> 405	> 350	> 264	> 287	> 272	> 383		> 279	> 201
<b>Acenaphthen</b>	> 203				> 181		> 183	> 186	> 402
<b>Acenaphthylen</b>									
<b>Anthracen</b>	> 405	> 175	> 176		> 362	> 191	> 1278	> 372	> 402
<b>Benzo[a]anthracen</b>				> 191		> 383	> 365	> 186	> 201
<b>Benzo[a]pyren</b>	> 405	> 175	> 176	> 191	> 362	> 383	> 548	> 372	> 402
<b>Benzo[b]fluoranthen</b>	> 405	> 175	> 352	> 382	> 181	> 574	> 730	> 372	> 402
<b>Benzo[ghi]perylen</b>	> 203	> 175	> 352		> 181	> 383	> 548	> 372	> 402
<b>Benzo[k]fluoranthen</b>							> 365	> 186	> 201
<b>Chrysen</b>	> 405	> 175	> 352	> 191	> 181	> 191	> 730	> 372	> 402
<b>Fluoranthen</b>	> 1823	> 1227	> 1761	> 955	> 1992	> 1915	> 2373	> 2601	> 3220
<b>Fluoren</b>	> 608	> 350	> 352	> 191	> 543	> 383	> 548	> 743	> 805
<b>Indeno[1,2,3-cd]pyren</b>									
<b>Naphthalin</b>	1215	438	352	382	543	670		743	553
<b>Phenanthren</b>	> 4659	> 3855		> 2866			> 6388		> 7044
<b>Pyren</b>	> 1418	> 1051	> 1937	> 764	> 1630	> 1532	> 2008	> 2043	> 3019
<b>Bisphenol A</b>	729	456	528	306	217	268	949	632	684
<b>Benzotriazol</b>	506	456	466	597	463	535	413	552	547
<b>PFOS</b>				86	107	109			134

## 2 Grafische Zusammenstellung

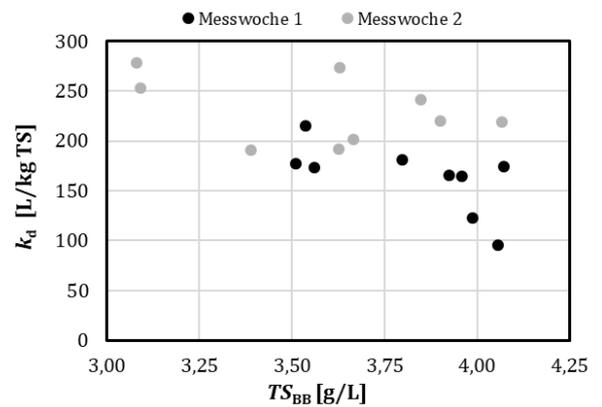
### 2.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung $TS_{BB}$

Stoffgruppe I

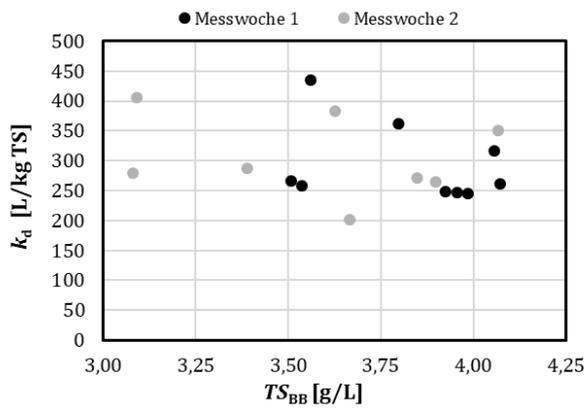
A: Carbamazepin



B: Imidacloprid

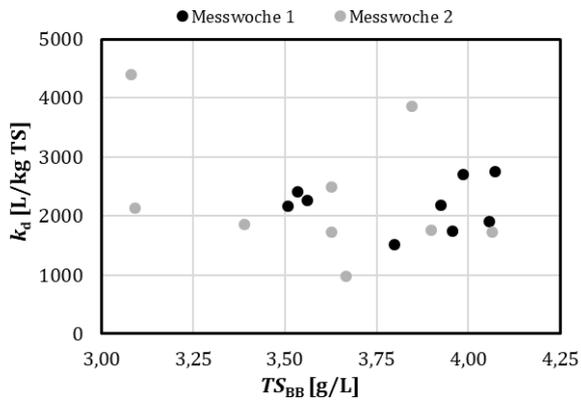


C: Terbutryn\*

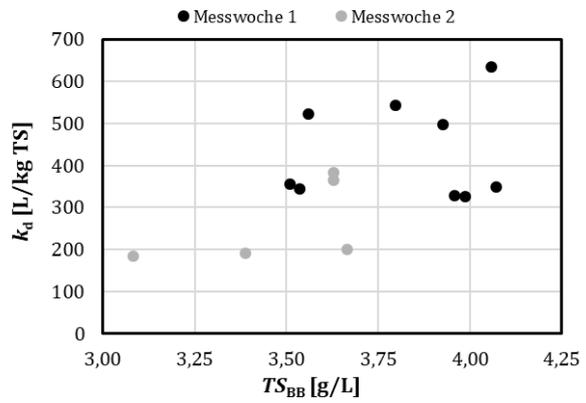


Stoffgruppe II

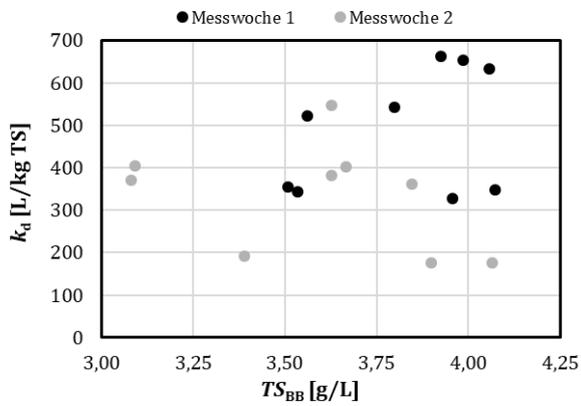
A: Nickel



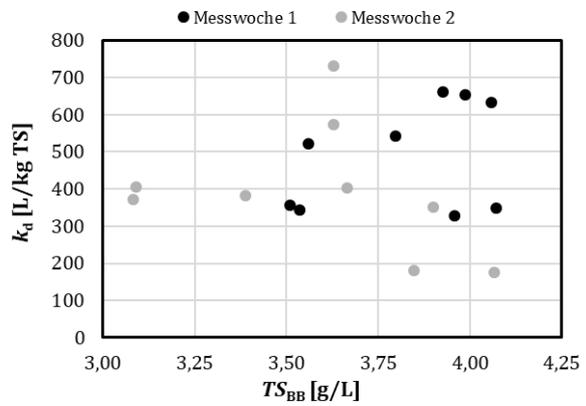
B: Benzo[a]anthracen\*



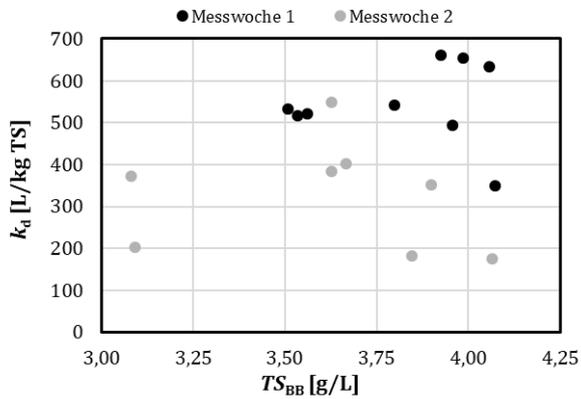
C: Benzo[a]pyren\*



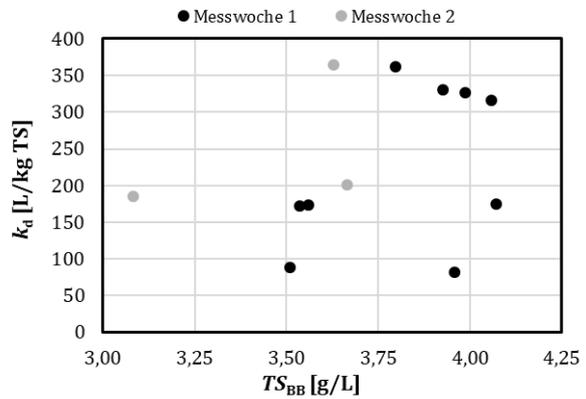
D: Benzo[b]flouranthen\*



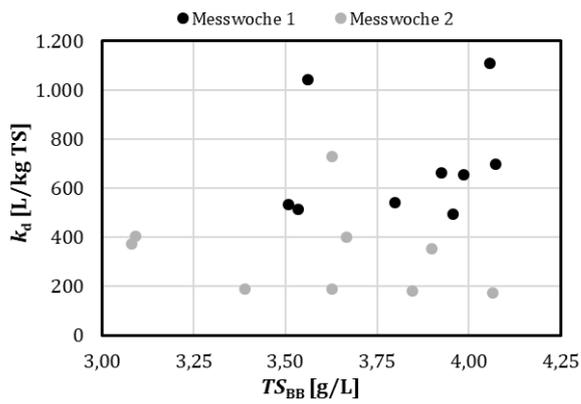
E: Benzo[ghi]perylen\*



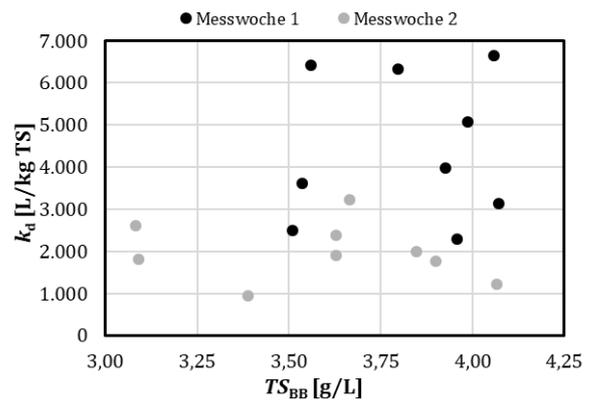
F: Benzo[k]flouranthen\*



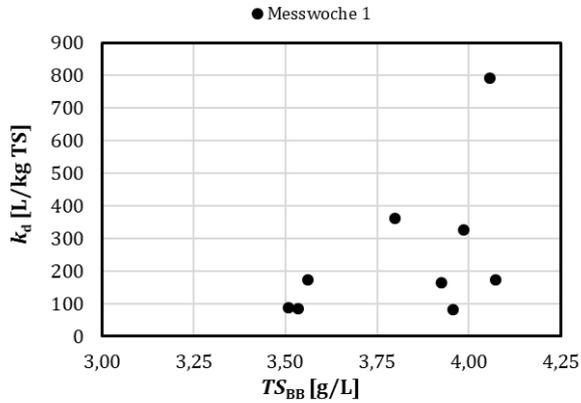
**G: Chrysen\***



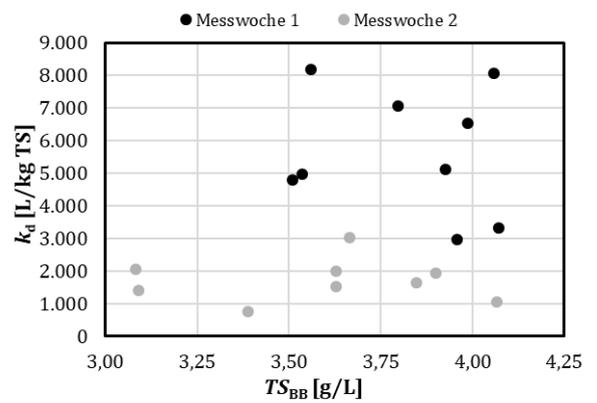
**H: Flouranthen\***



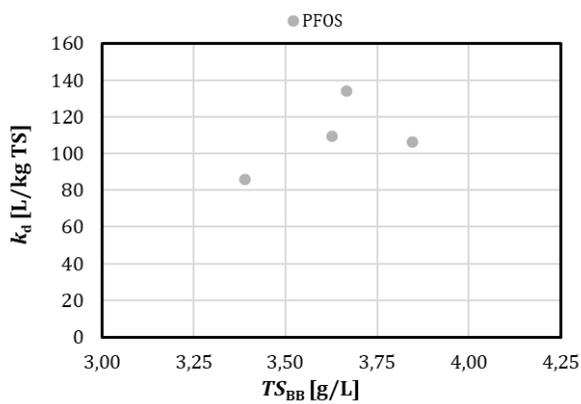
**I: Indeno[1,2,3-de]perylene\***



**J: Pyren\***

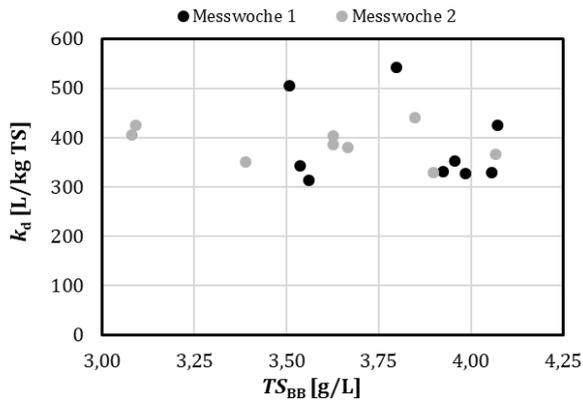


**K: PFOS\***

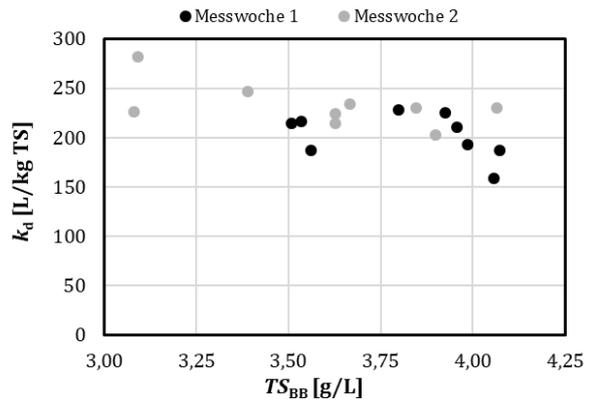


Stoffgruppe III

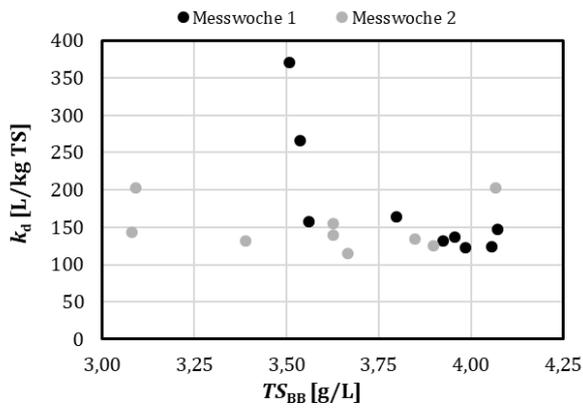
A: Ciprofloxacin



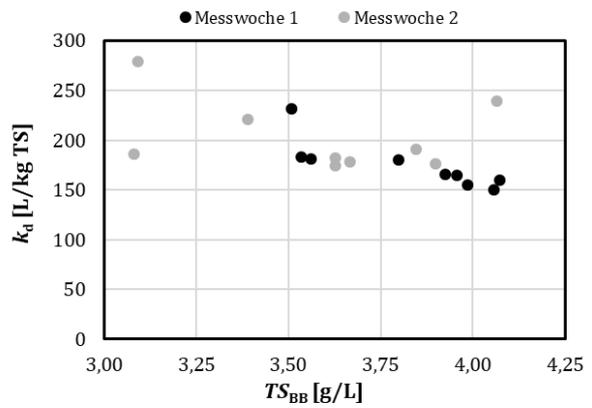
B: Diclofenac



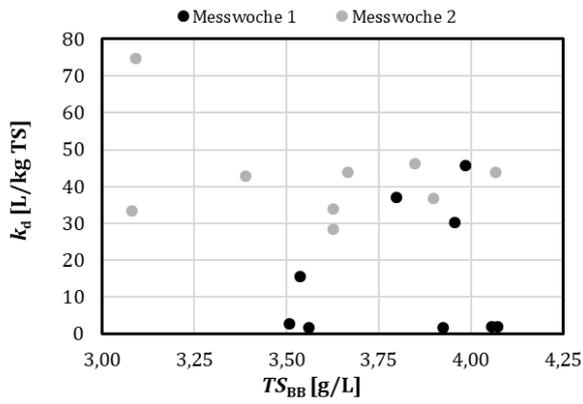
C: Gabapentin



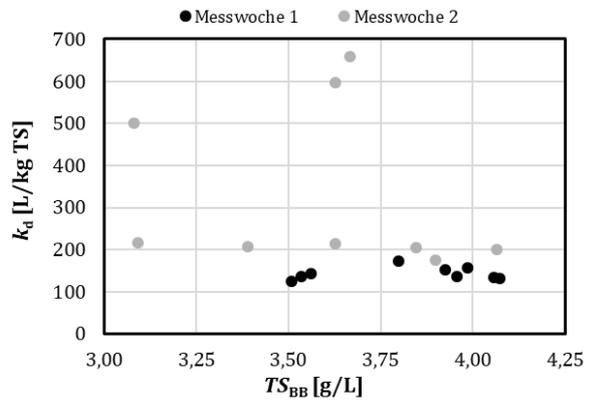
D: Metoprolol



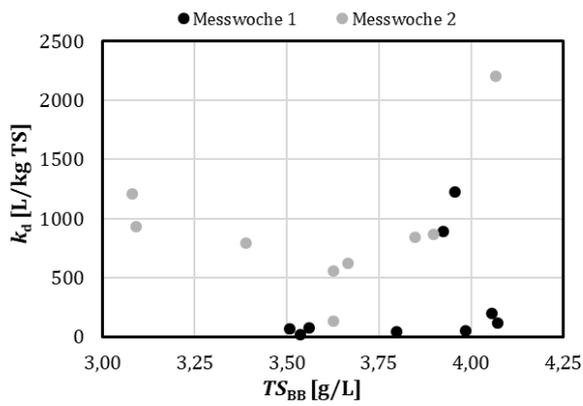
E: Sulfamethoxazol



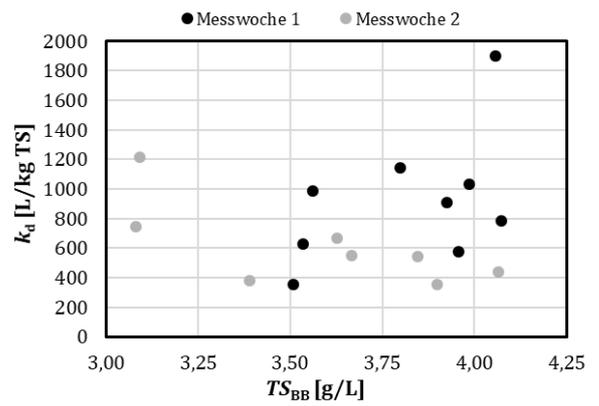
F: Trimethoprim



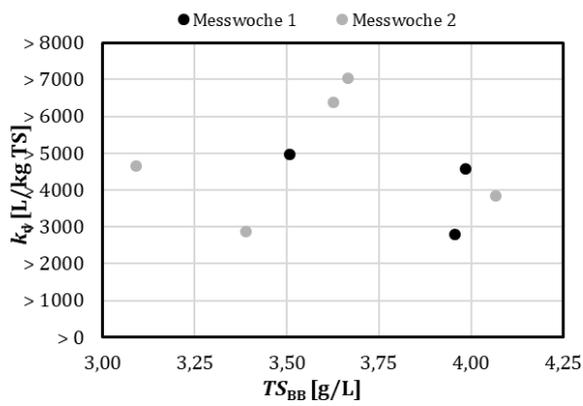
**G: Glyphosat**



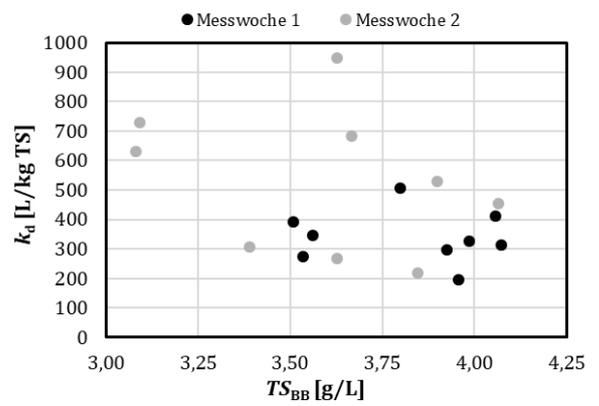
**H: Naphtalin**



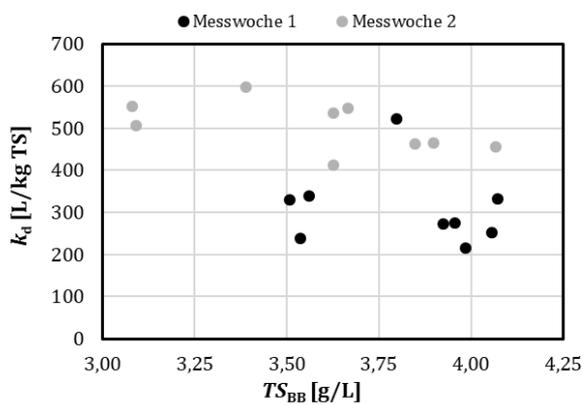
**I: Phenanthren\***



**J: Bisphenol-A**

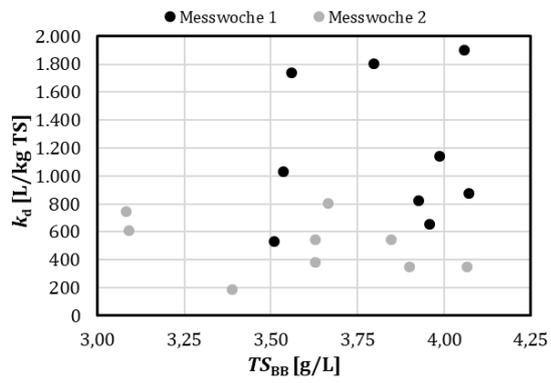


**K: Benzotriazol**

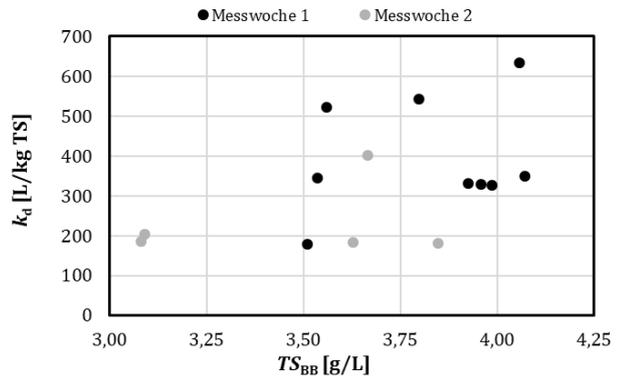


Stoffgruppe IV

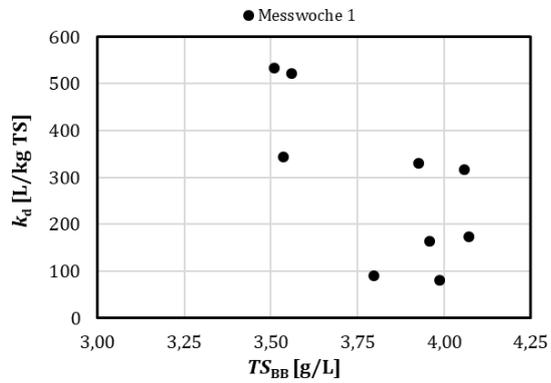
A: Flouren\*



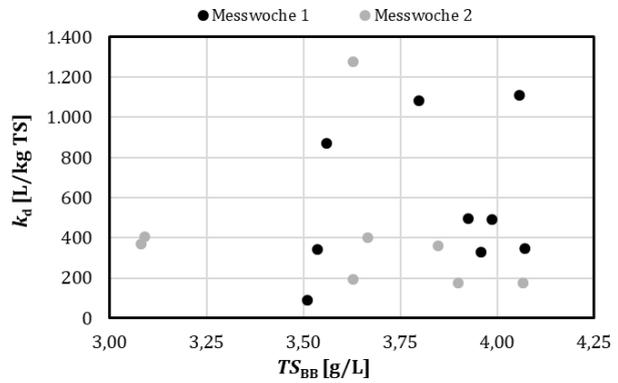
B: Acenaphthen\*



C: Acenaphthylen\*

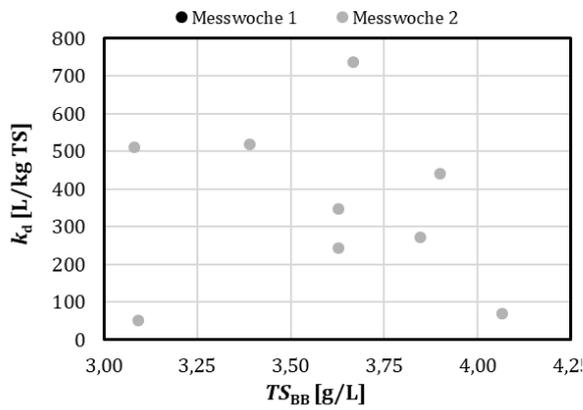


D: Anthracen\*

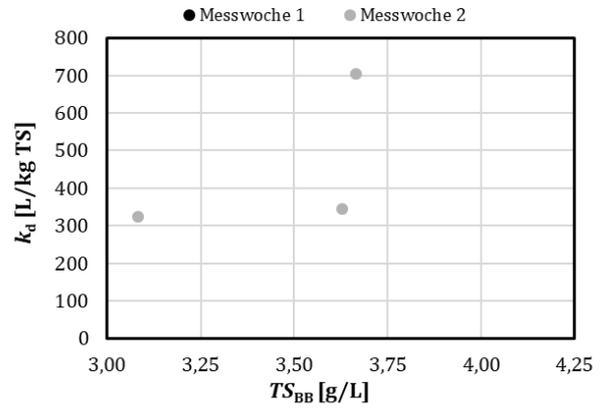


Stoffgruppe V

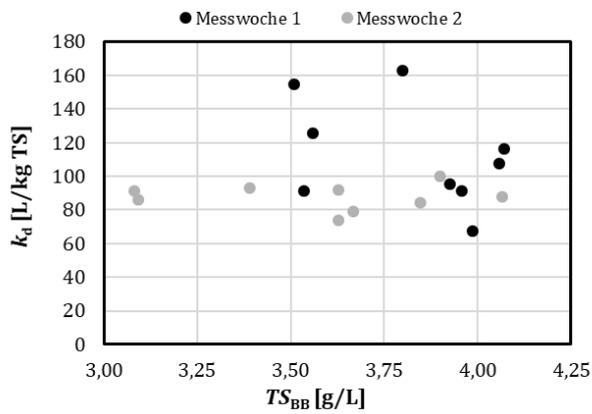
**A: Coffein**



**B: Ibuprofen**



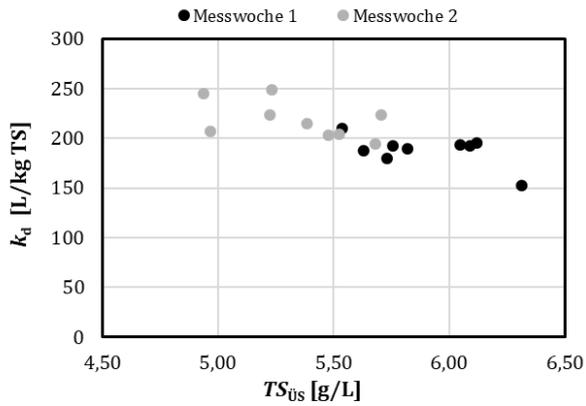
**C: Metformin**



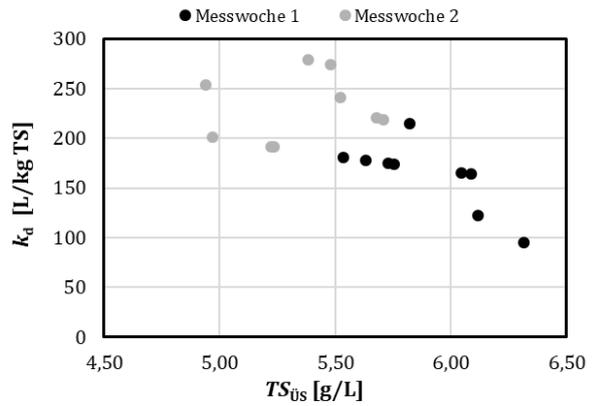
## 2.2 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm $TS_{\text{ÜS}}$

### Stoffgruppe I

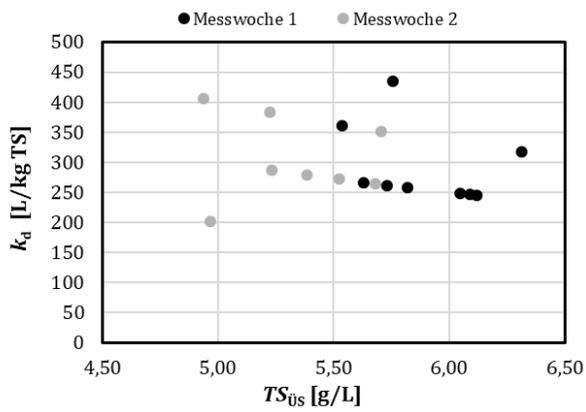
A: Carbamazepin



B: Imidacloprid

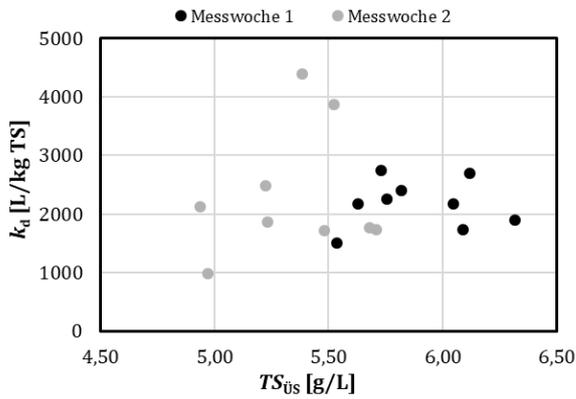


C Terbutryn\*

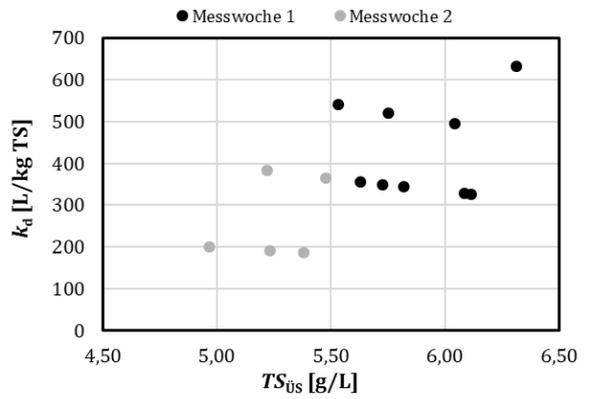


Stoffgruppe II

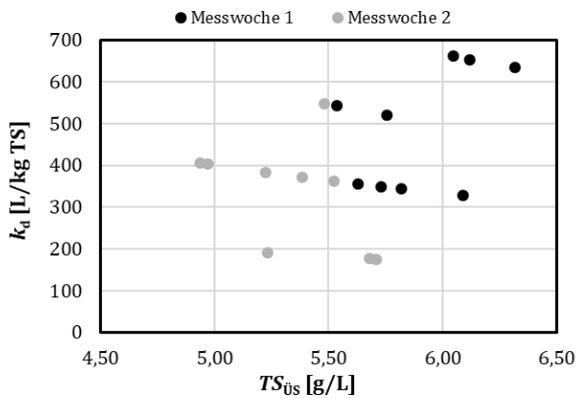
A: Nickel



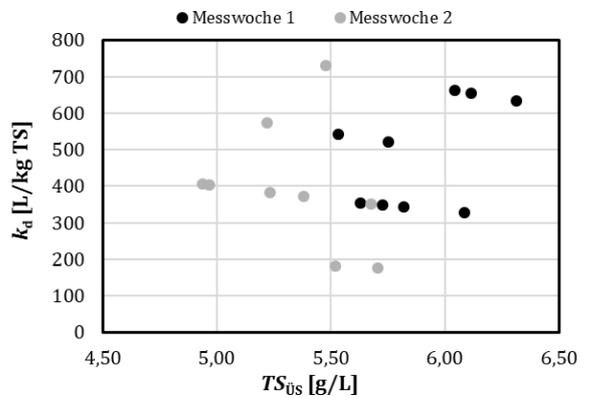
B: Benzo[a]anthracen\*



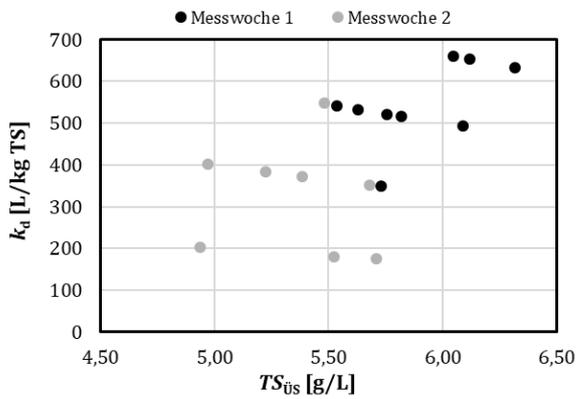
C: Benzo[a]pyren\*



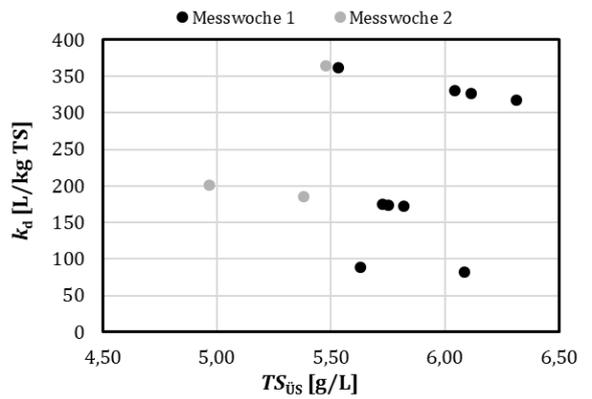
D: Benzo[b]flouranthen\*



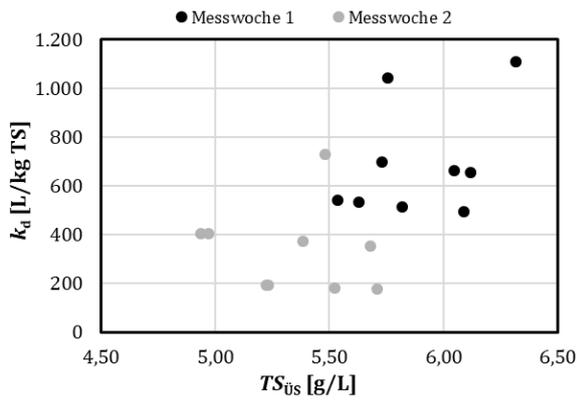
E: Benzo[ghi]perylen\*



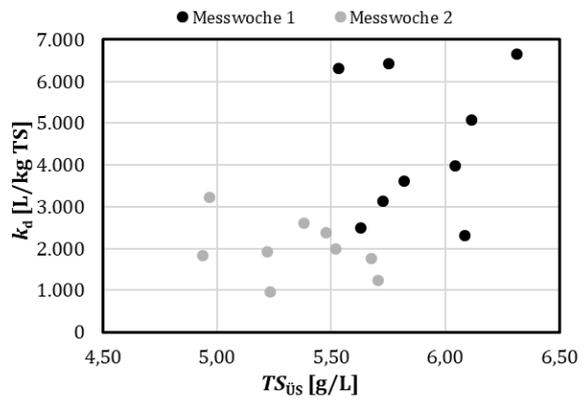
F: Benzo[k]flouranthen\*



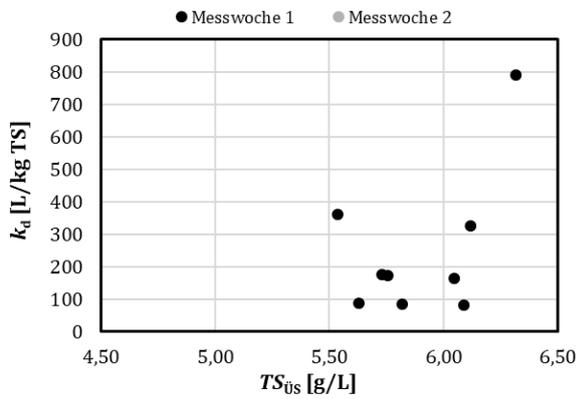
**G: Chrysen\***



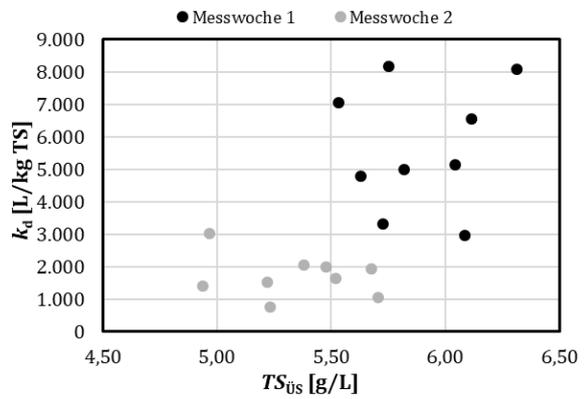
**H: Flouranthen\***



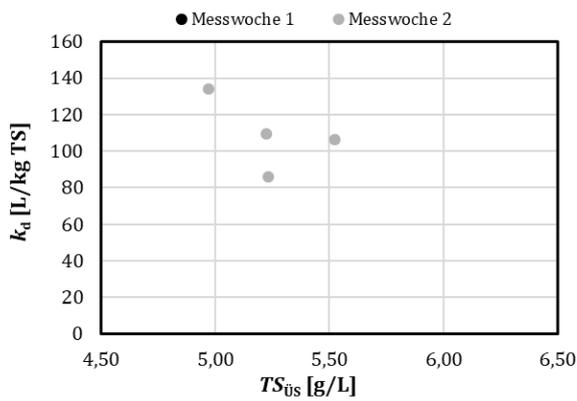
**I: Indeno[1,2,3-de]perylene\***



**J: Pyren\***

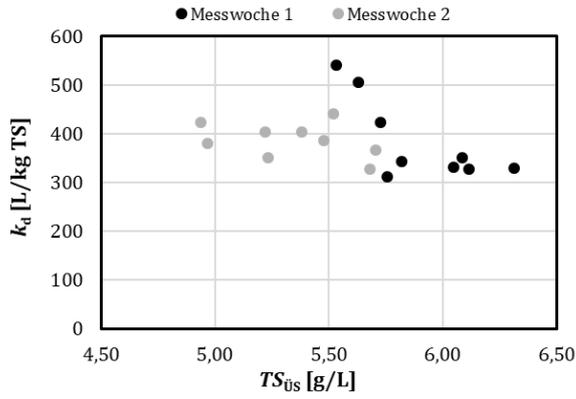


**K: PFOS\***

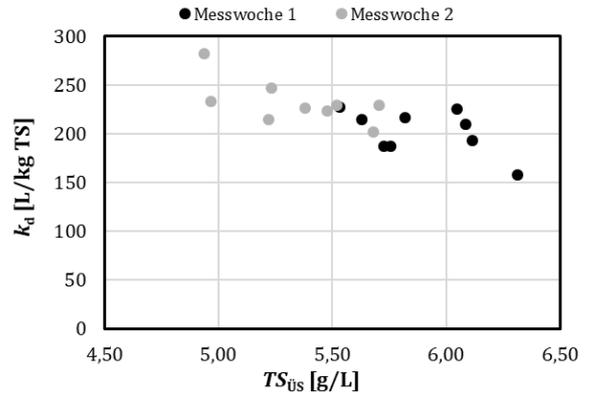


Stoffgruppe III

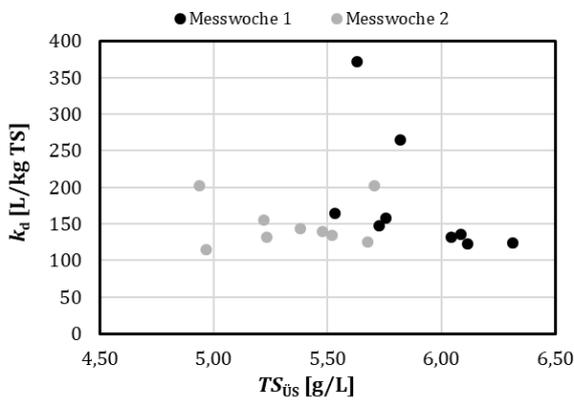
**A: Ciprofloxacin**



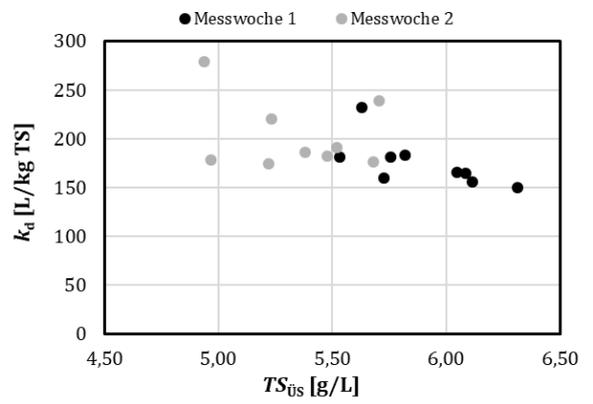
**B: Diclofenac**



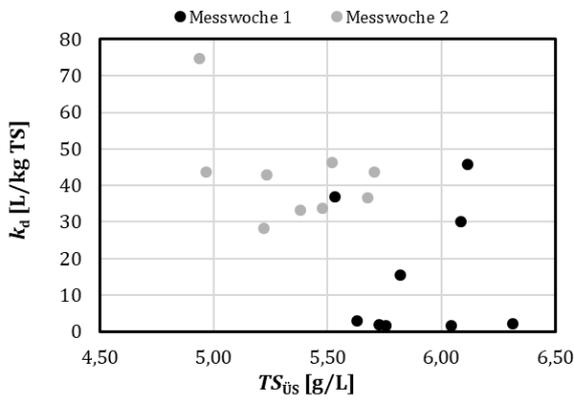
**C: Gabapentin**



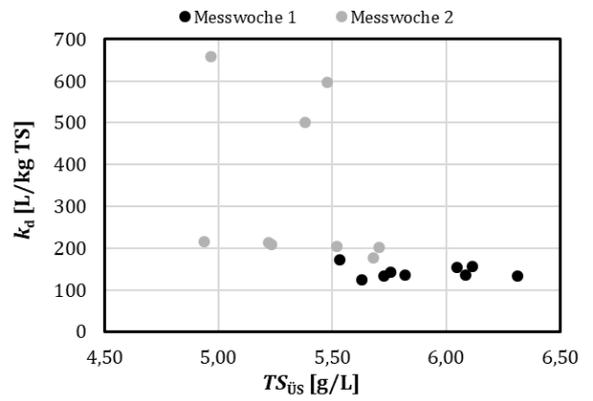
**D: Metoprolol**



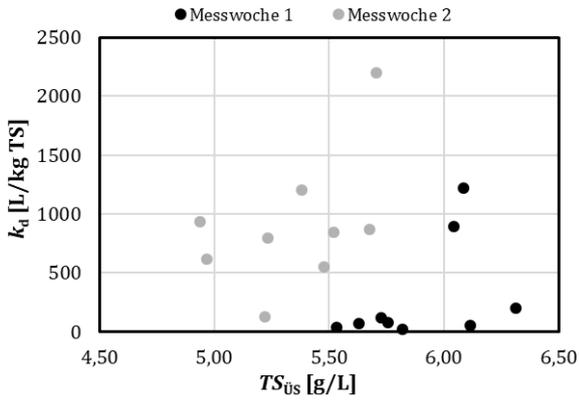
**E: Sulfamethoxazol**



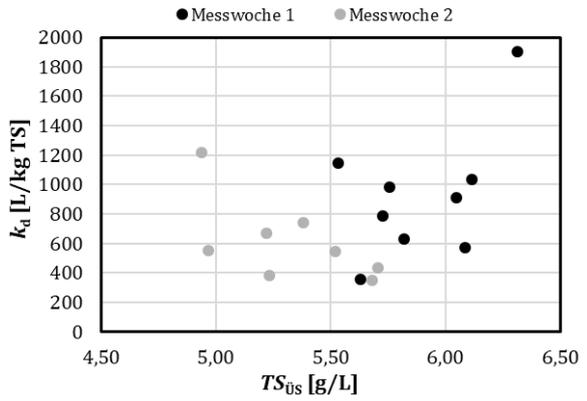
**F: Trimethoprim**



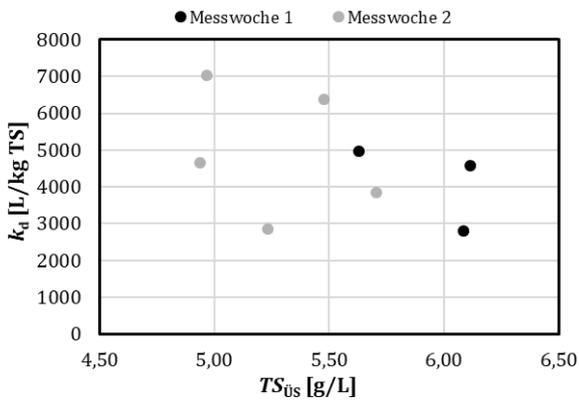
**G: Glyphosat**



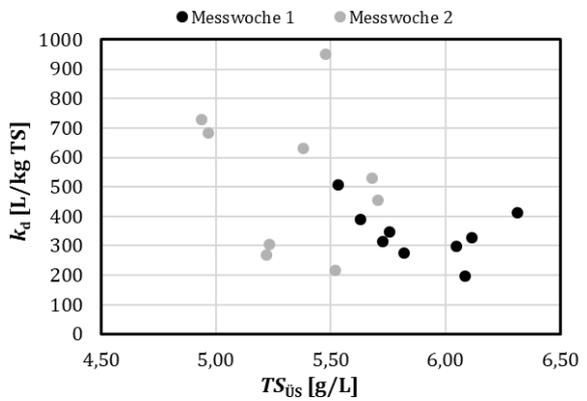
**H: Naphtalin**



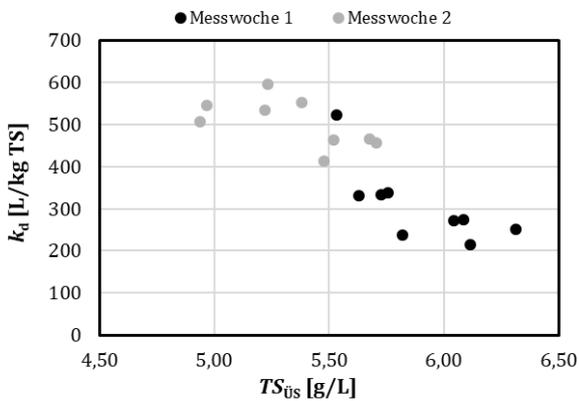
**I: Phenanthren\***



**J: Bisphenol-A**



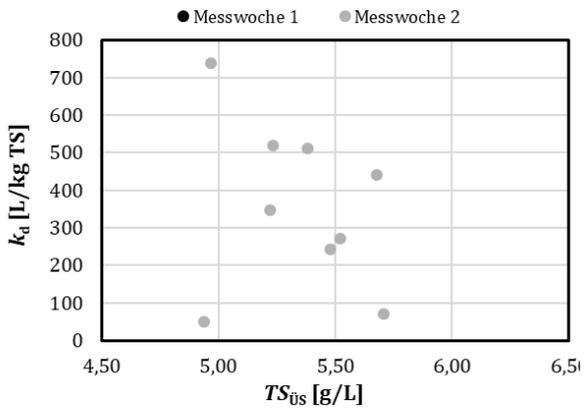
**K: Benzotriazol**



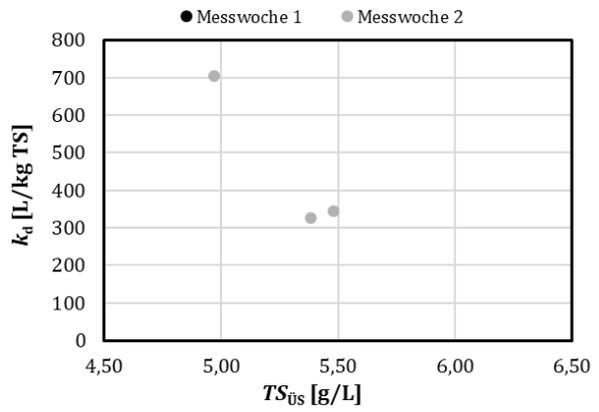


Stoffgruppe V

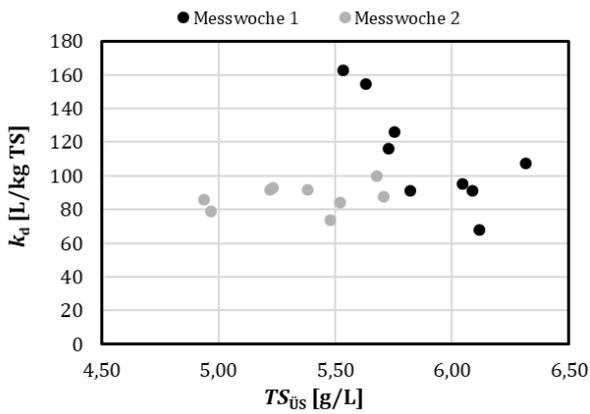
A: Coffein



B: Ibuprofen



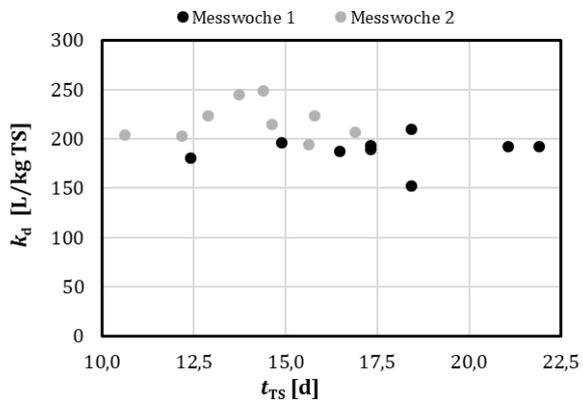
C: Metformin



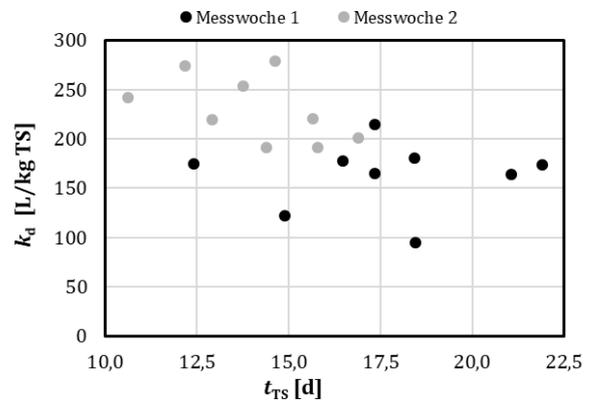
## 2.3 Einfluss des Schlammalter $t_{TS}$

### Stoffgruppe I

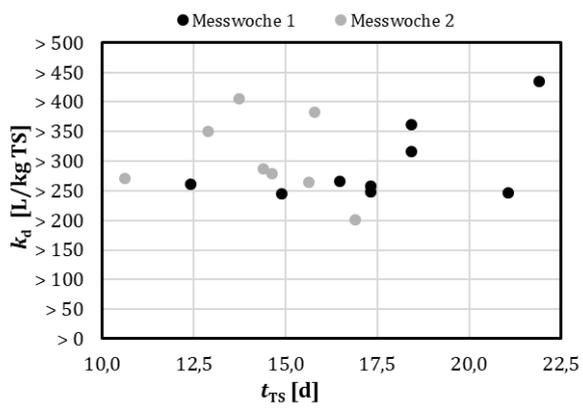
A: Carbamazepin



B: Imidacloprid

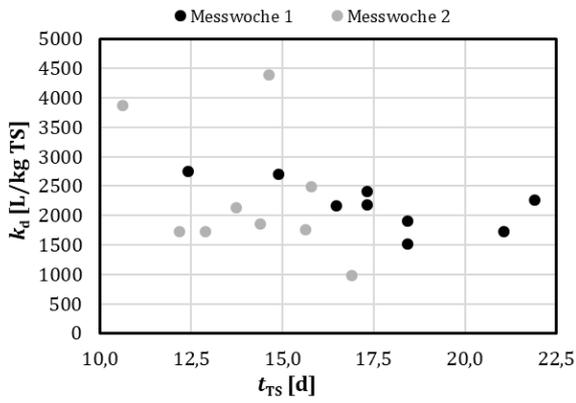


C: Terbutryn\*

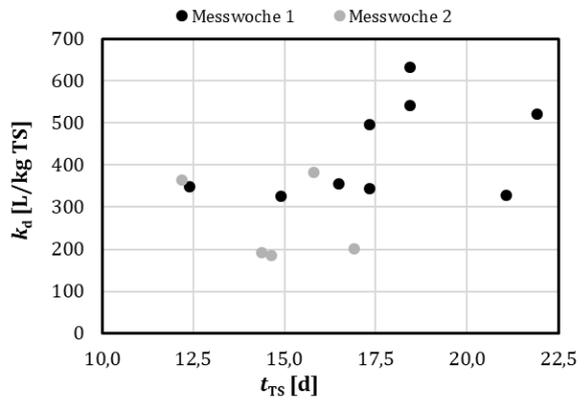


Stoffgruppe II

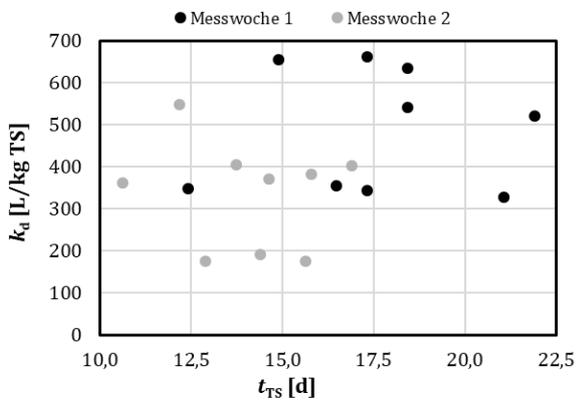
A: Nickel



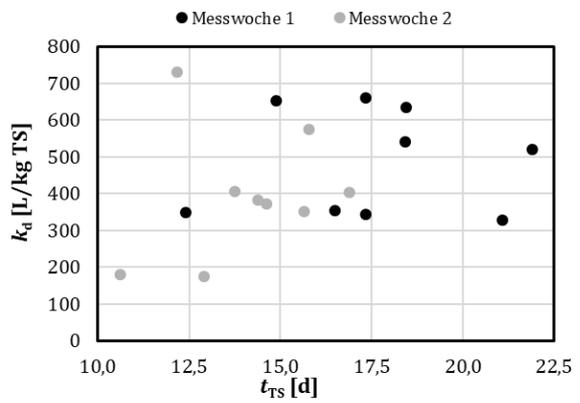
B: Benzo[a]anthracen\*



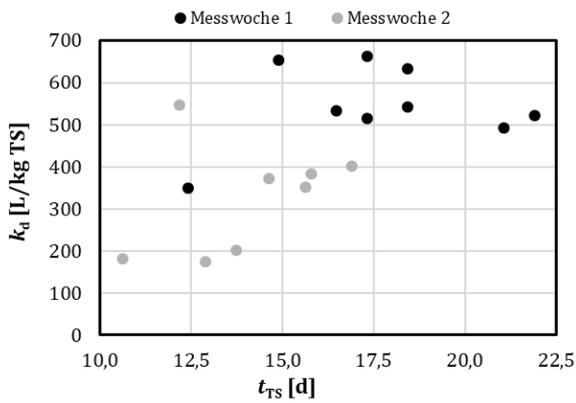
C: Benzo[a]pyren\*



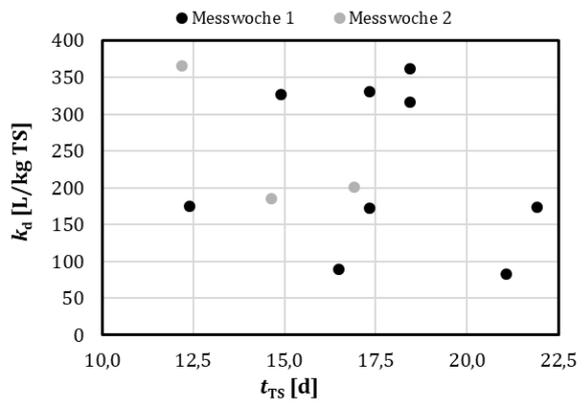
D: Benzo[b]flouranthen\*



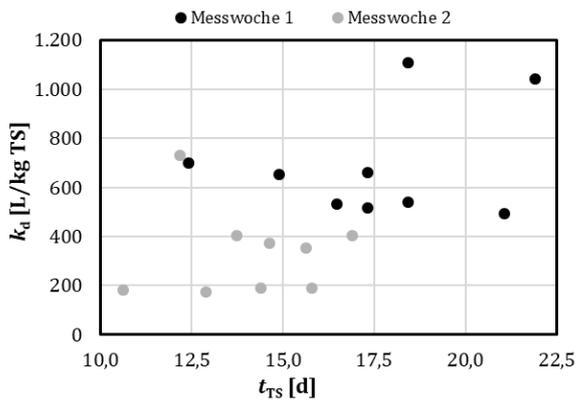
E: Benzo[ghi]perylen\*



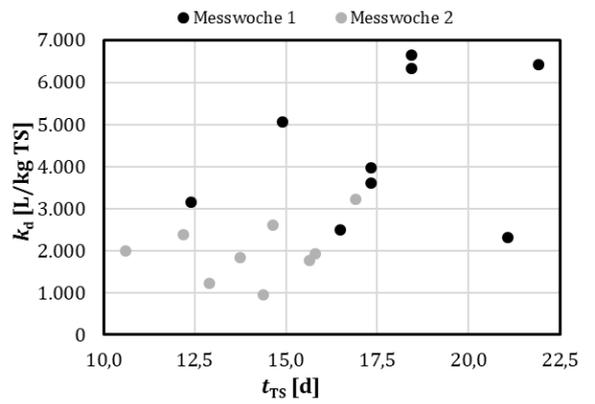
F: Benzo[k]flouranthen\*



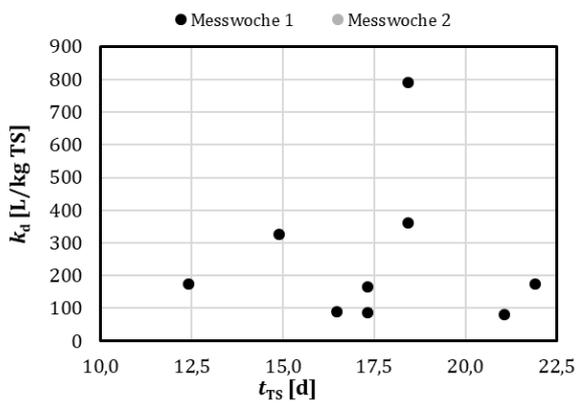
**G: Chrysen\***



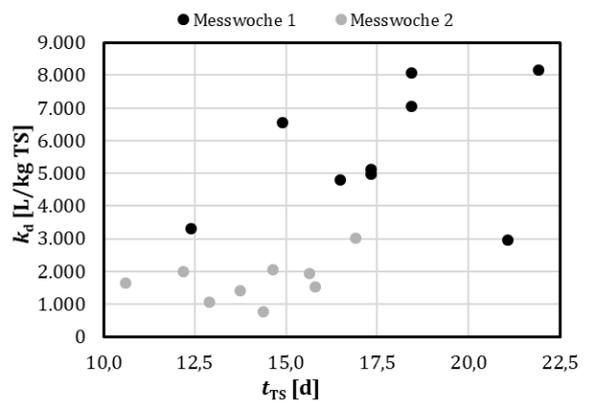
**H: Flouranthen\***



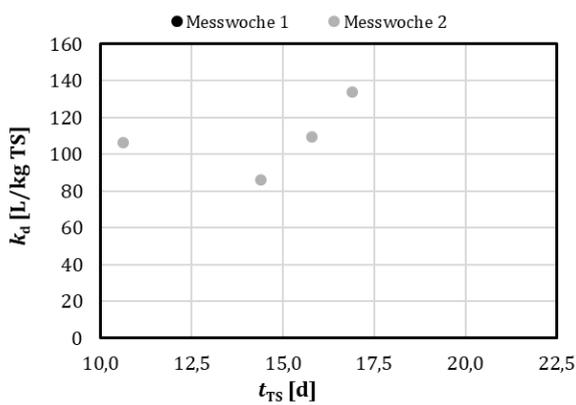
**I: Indeno[1,2,3-de]perylene\***



**J: Pyren\***

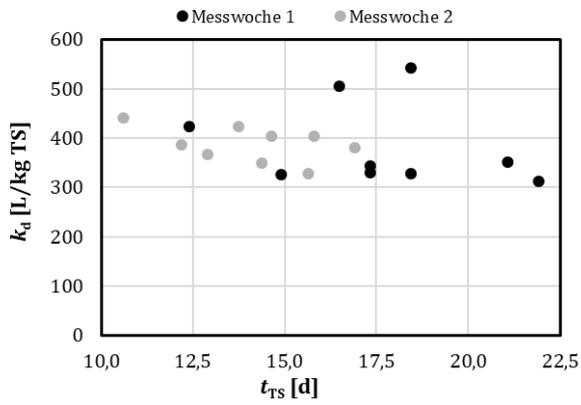


**K: PFOS\***

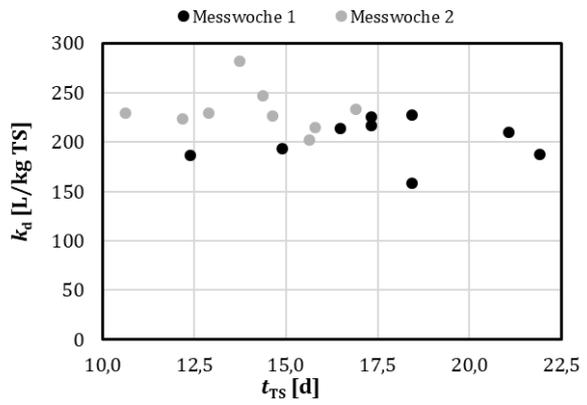


Stoffgruppe III

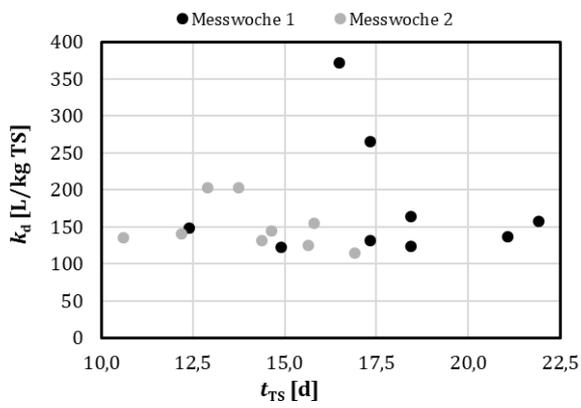
A: Ciprofloxacin



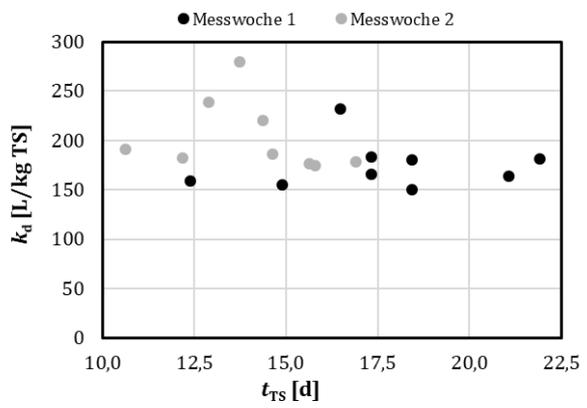
B: Diclofenac



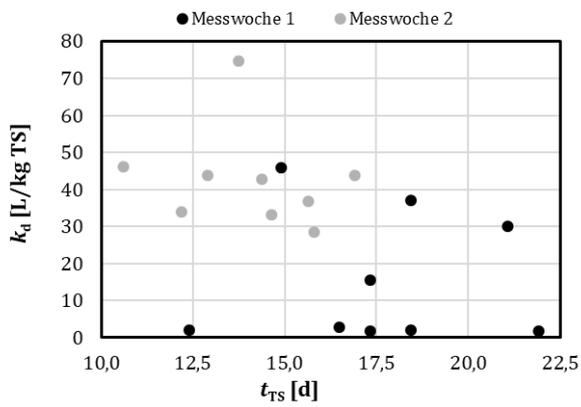
C: Gabapentin



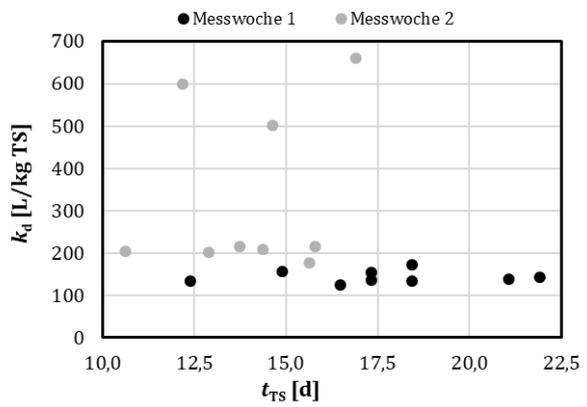
D: Metoprolol



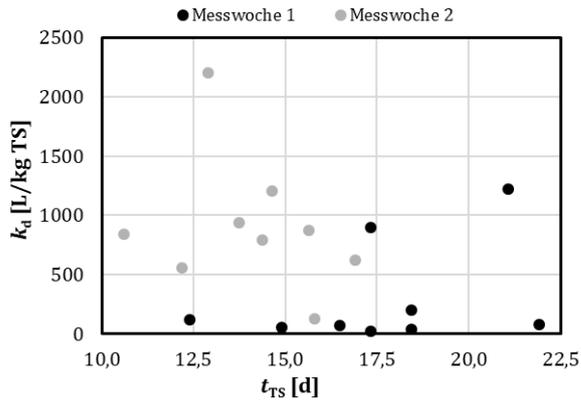
E: Sulfamethoxazol



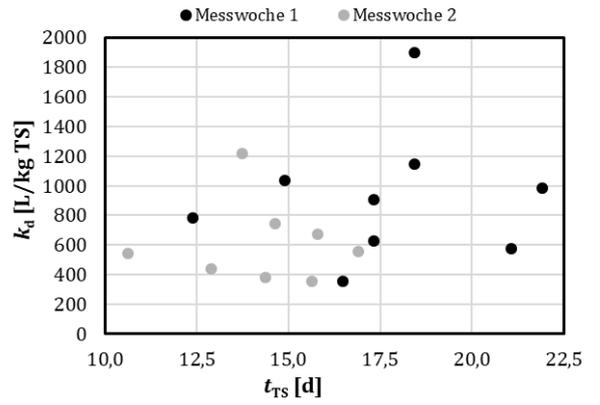
F: Trimethoprim



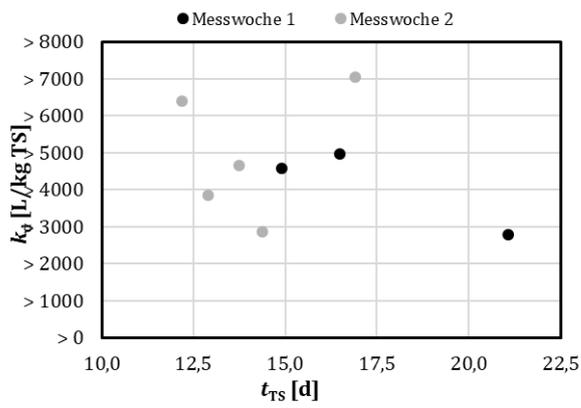
**G: Glyphosat**



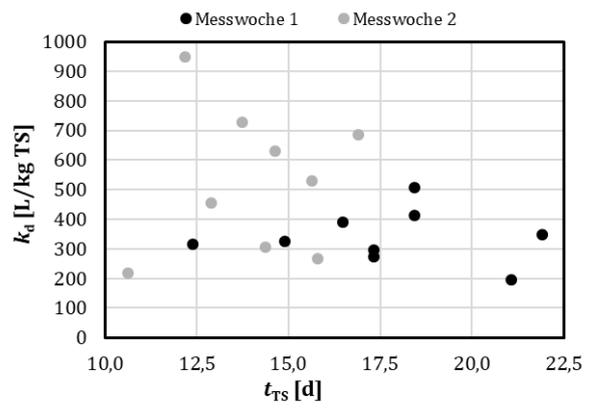
**H: Naphtalin**



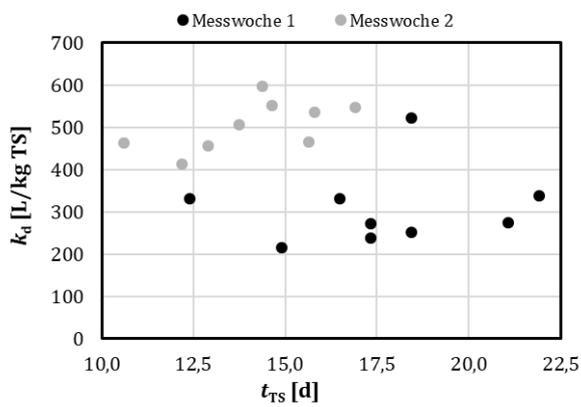
**I: Phenanthren\***



**J: Bisphenol-A**

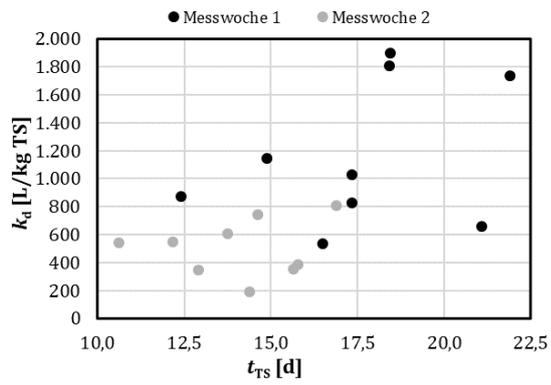


**K: Benzotriazol**

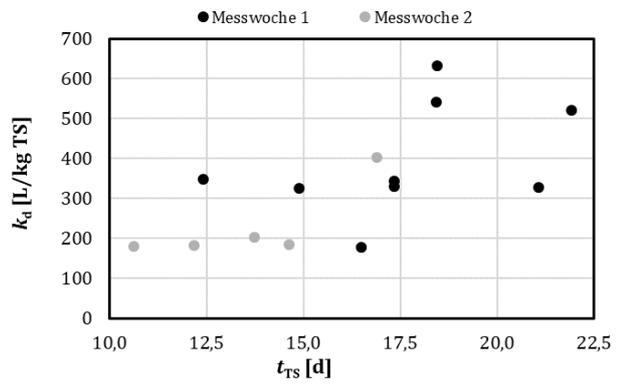


Stoffgruppe IV

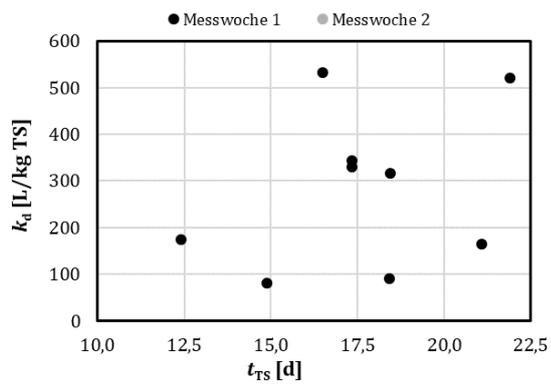
A: Flouren\*



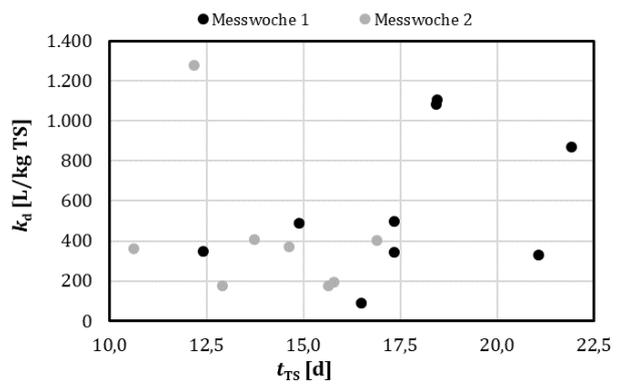
B: Acenaphthen\*



C: Acenaphthylen\*

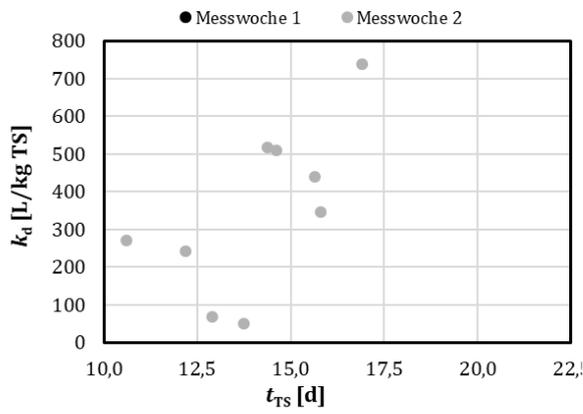


D: Anthracen\*

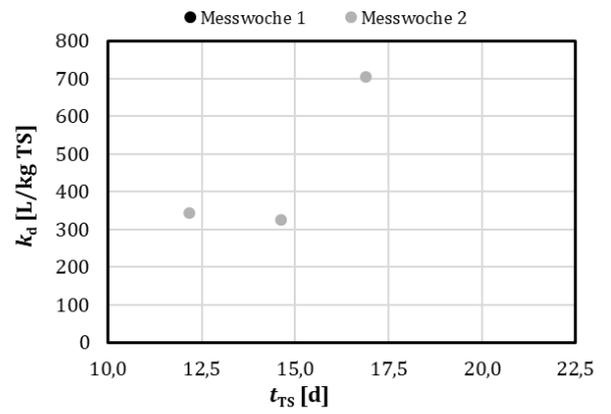


Stoffgruppe V

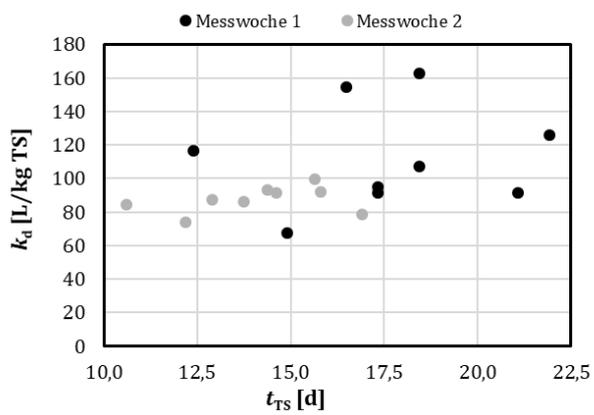
**A: Coffein**



**B: Ibuprofen**



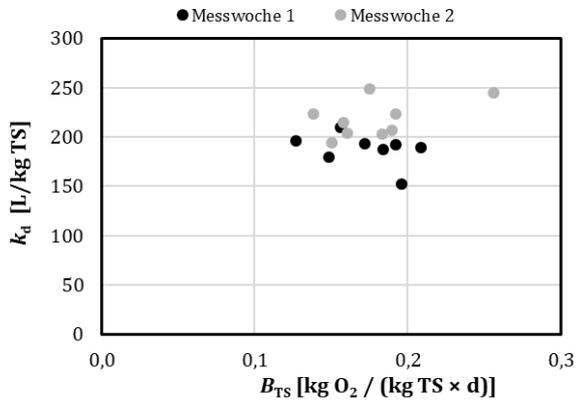
**C: Metformin**



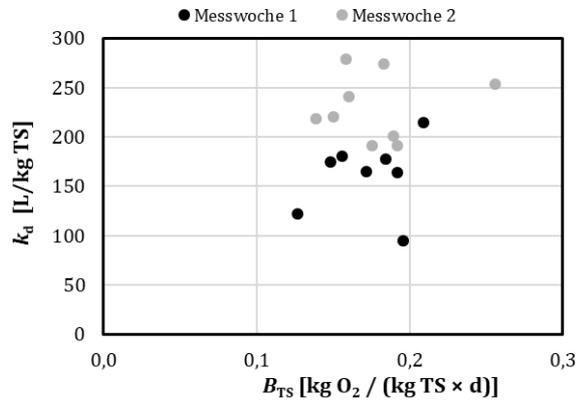
## 2.4 Einfluss der Schlammbelastung $B_{TS}$

### Stoffgruppe I

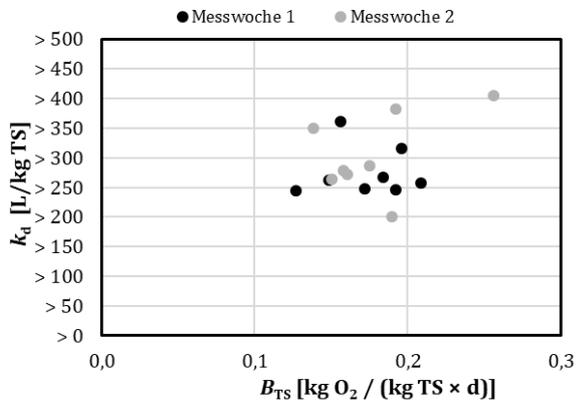
A: Carbamazepin



B: Imidacloprid

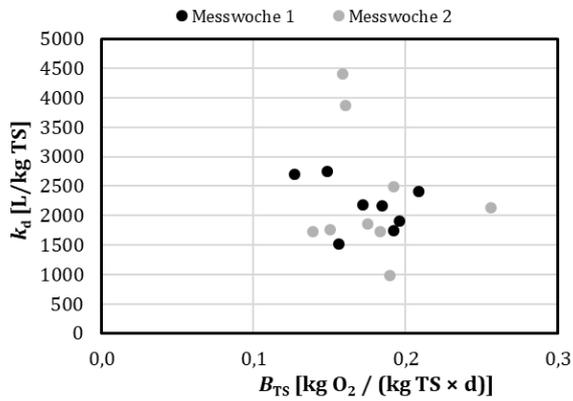


C: Terbutryn\*

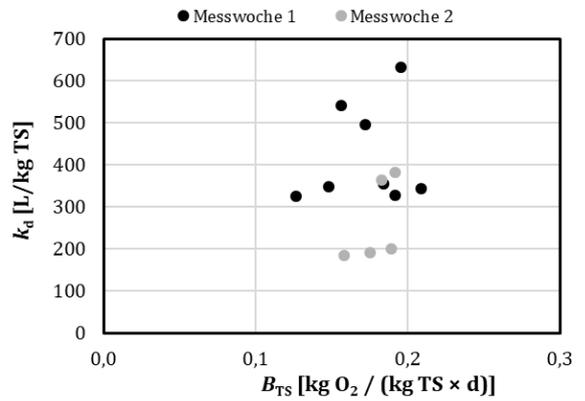


Stoffgruppe II

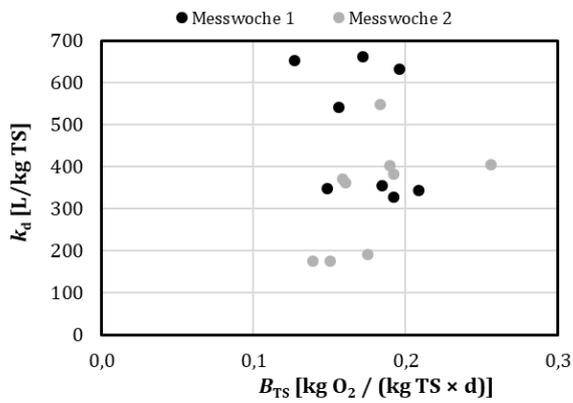
A: Nickel



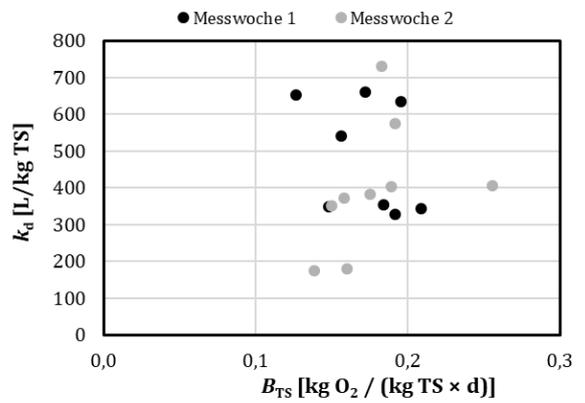
B: Benzo[a]anthracen\*



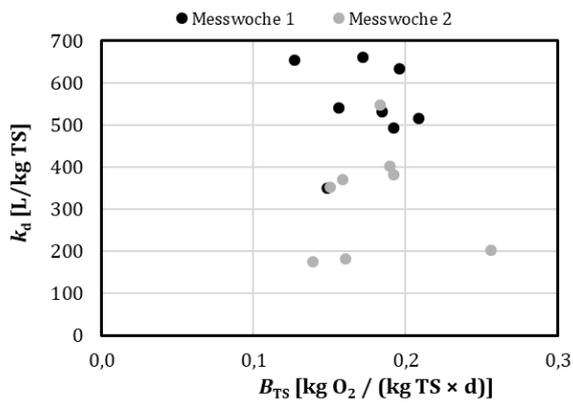
C: Benzo[a]pyren\*



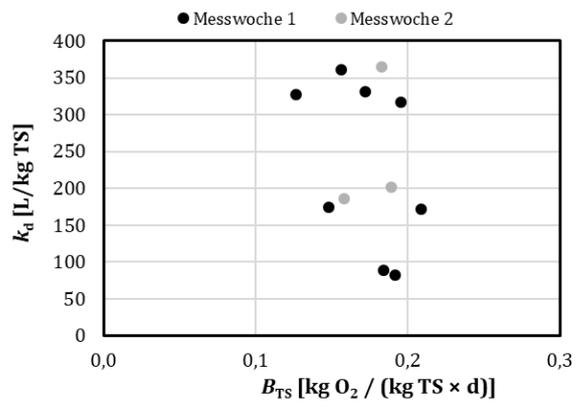
D: Benzo[b]flouranthen\*



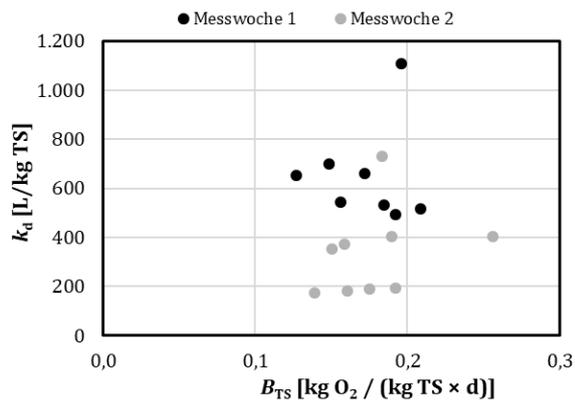
E: Benzo[ghi]perylen\*



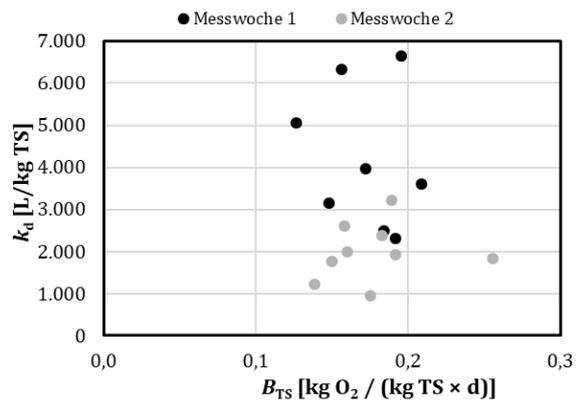
F: Benzo[k]flouranthen\*



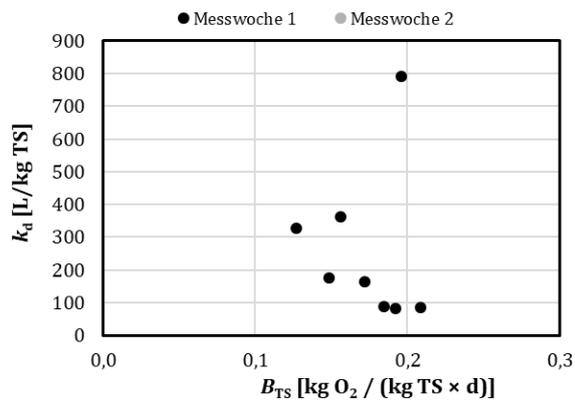
**G: Chrysen\***



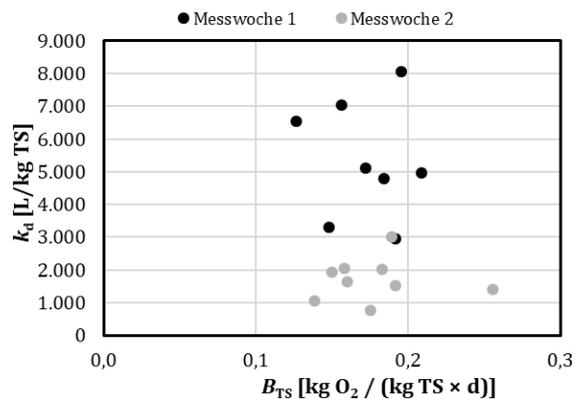
**H: Flouranthen\***



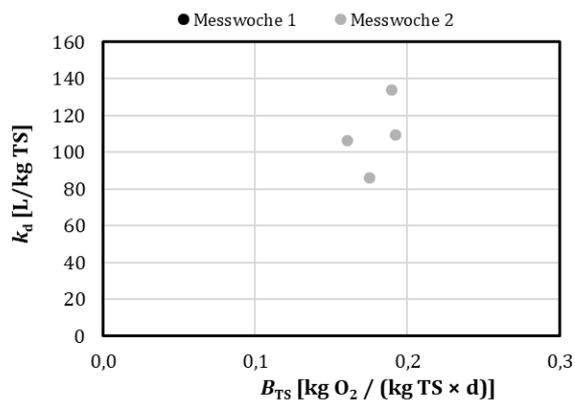
**I: Indeno[1,2,3-de]perylene\***



**J: Pyren\***

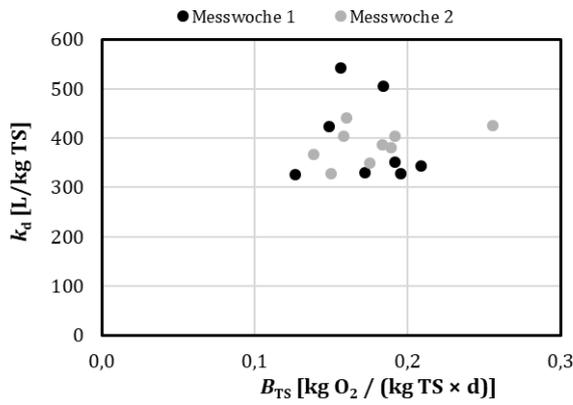


**K: PFOS**

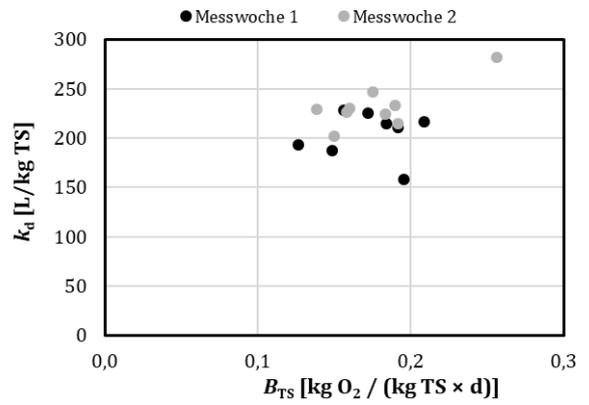


Stoffgruppe III

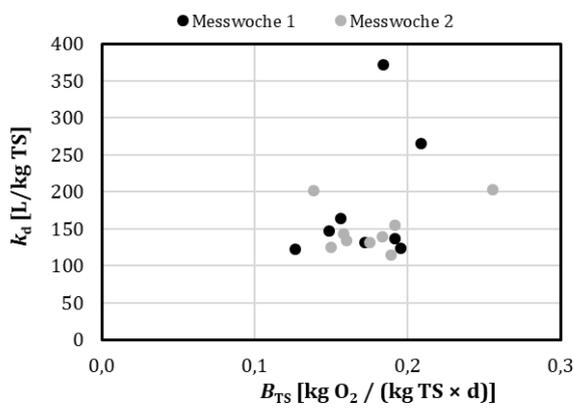
A: Ciprofloxacin



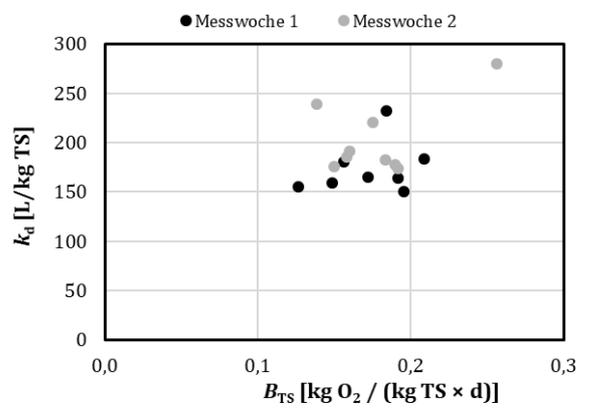
B: Diclofenac



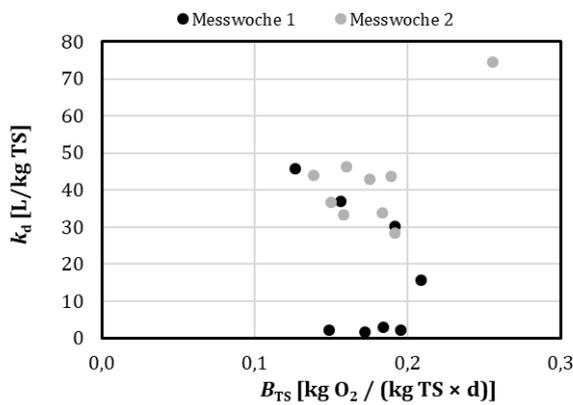
C: Gabapentin



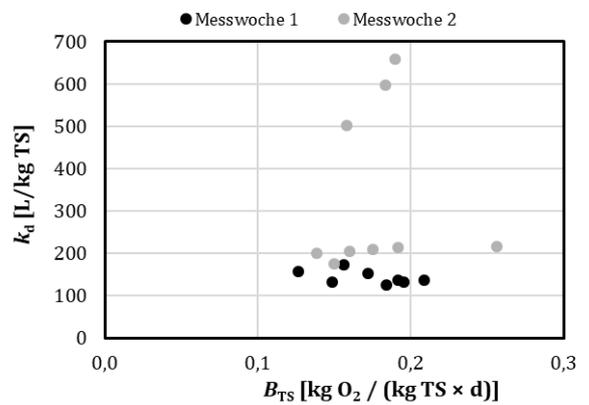
D: Metoprolol



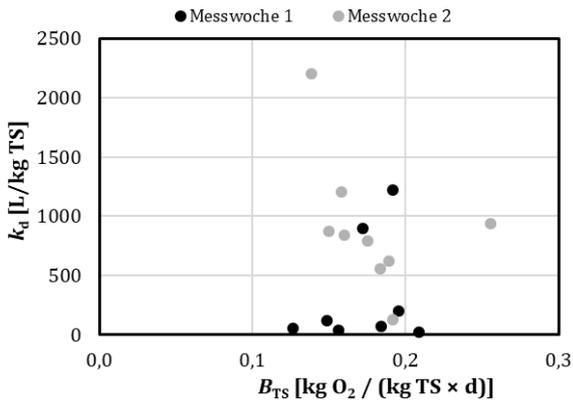
E: Sulfamethoxazol



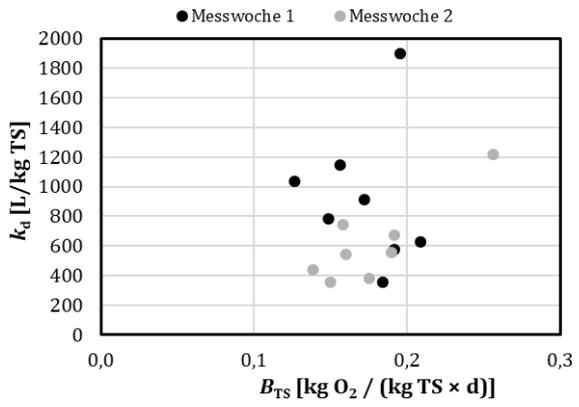
F: Trimethoprim



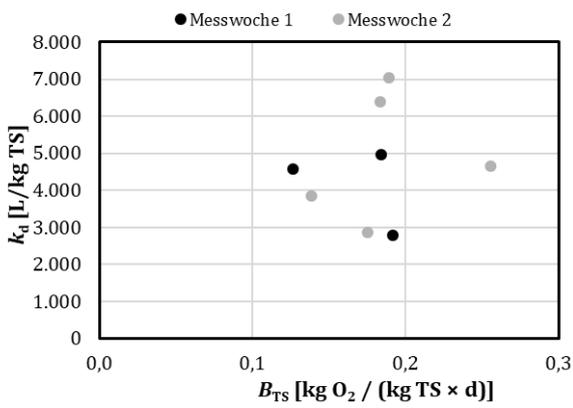
**G: Glyphosat**



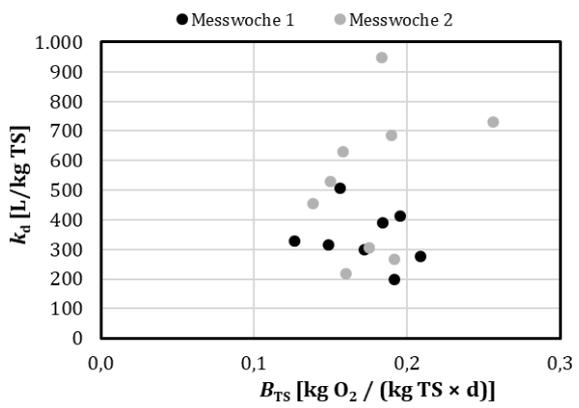
**H: Naphtalin**



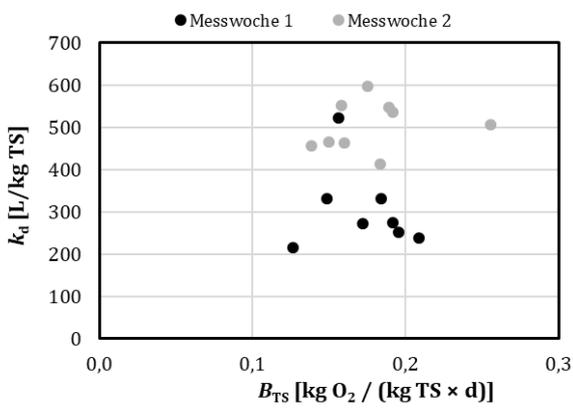
**I: Phenanthren\***



**J: Bisphenol-A**

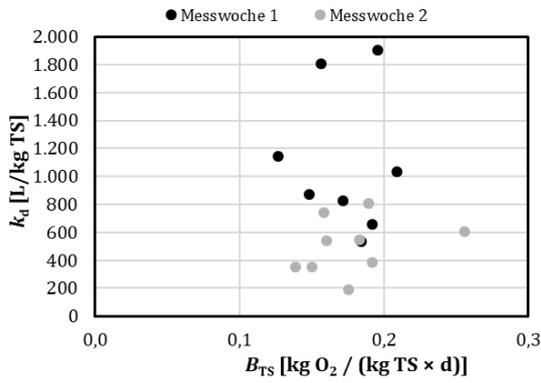


**K: Benzotriazol**

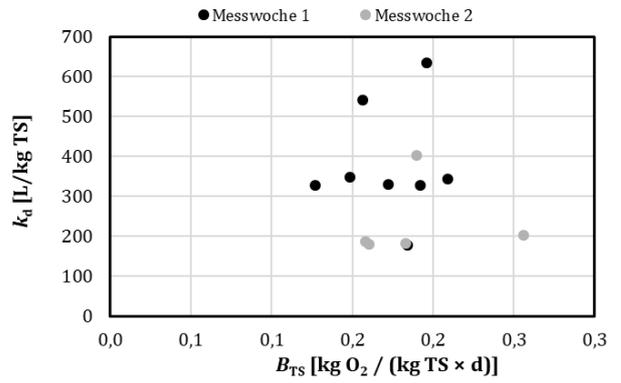


Stoffgruppe IV

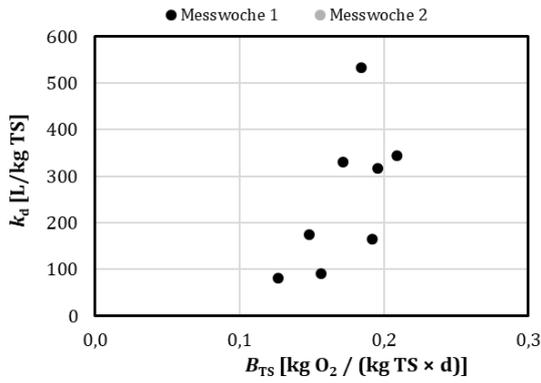
A: Flouren\*



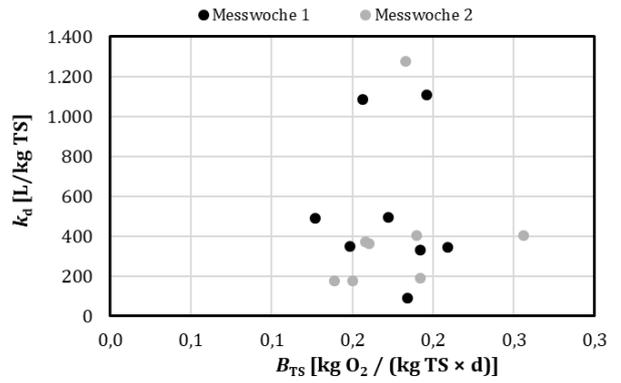
B: Acenaphthen\*



C: Acenaphthylen\*

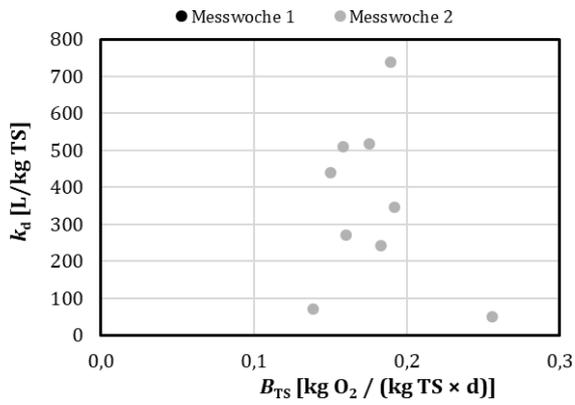


D: Anthracen\*

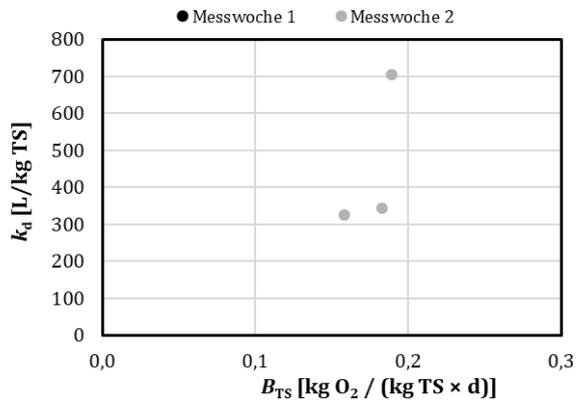


Stoffgruppe V

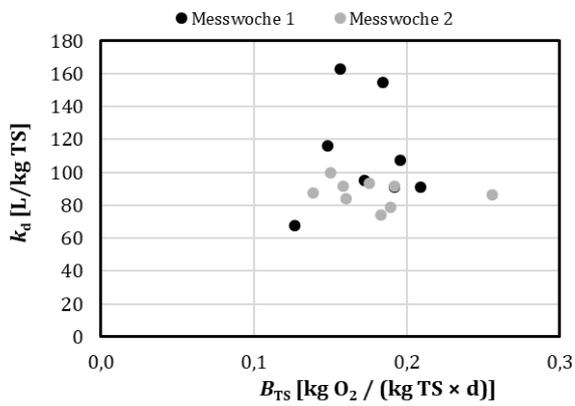
A: Coffein



B: Ibuprofen



C: Metformin



## Anhang 4 – Biodegradationskonstanten $k_{\text{bio}}$

1	Tabellarische Zusammenstellung.....	222
1.1	Analyseergebnisse .....	222
1.2	Biodegradationskonstanten.....	232
1.3	Sorptionskoeffizienten .....	233
2	Grafische Zusammenstellung der Biodegradationskonstanten in Abhängigkeiten der Betriebsparameter .....	234
2.1	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung $TS_{\text{BB}}$ .....	234
2.2	Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm $TS_{\text{ÜS}}$ .....	238
2.3	Einfluss des Schlammalter $t_{\text{TS}}$ .....	242
2.4	Einfluss der Schlammbelastung $B_{\text{TS}}$ .....	246

# 1 Tabellarische Zusammenstellung

## 1.1 Analyseergebnisse

			BEGLEITPARAMETER						
			Q <sub>d</sub>	pH	LF	Redox	O <sub>2</sub>	T	TS
MW	ID-ges	[m <sup>3</sup> /d]	[-]	[µS/cm]	[mV]	[mg/l]	[°C]	[g/l]	
Zulauf	1	MK-Z-191101	0,026	7,95	1496	193	0,91	9,5	n.d.
		MK-Z-191104	0,026	8,02	1358	191	0,66	8,7	0,112
	2	MK-Z-191111	0,026	8,10	1465	226	0,48	7,7	0,012
		MK-Z-191114	0,026	8,01	1438	155	0,21	9,3	0,097
	3	MK-Z-191125	0,026	7,86	1421	199	1,00	8,7	0,045
		MK-Z-191128	0,026	7,93	1450	161	0,37	14,9	0,093
	4	MK-Z-191209	0,026	7,83	1373	191	1,02	8,2	0,048
		MK-Z-191212	0,026	8,40	1240	182	0,72	9,2	0,185
BS_V1	1	MK-1.2-191105	0,135	7,66	1091	136	2,17	14,6	1,084
	2	MK-1.2-191115	0,135	7,83	1308	105	0,81	10,9	0,674
	3	MK-1.2-191129	0,134	7,95	1236	180	5,31	12,3	0,233
	4	MK-1.2-191213	0,135	7,47	1046	244	0,49	10,6	2,741
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	0,001	7,58	1078	102	0,37	15,0	1,665
	2	MK-1.3-191115	0,001	7,63	1141	108	0,68	7,8	2,385
	3	MK-1.3-191129	0,001	7,87	1118	161	4,35	9,0	0,745
	4	MK-1.3-191213	0,001	7,62	1055	64	0,22	8,3	4,355
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	0,026	8,07	1106	170	8,41	9,8	0,000
		MK-1.4-191105	0,026	8,07	1080	151	7,83	12,8	0,030
	2	MK-1.4-191111	0,026	7,87	1015	211	3,77	10,6	0,064
		MK-1.4-191115	0,026	8,01	1257	107	4,91	10,3	0,166
	3	MK-1.4-191125	0,024	7,79	1127	290	4,20	8,4	0,053
		MK-1.4-191129	0,024	7,99	1220	245	5,58	8,4	0,021
	4	MK-1.4-191209	0,026	7,96	1056	251	5,28	10,6	0,081
		MK-1.4-191213	0,026	7,97	1033	n.d.	6,47	9,8	0,030
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,159	7,54	988	158	0,25	14,8	2,973
	2	MK-2.2-191115	0,159	7,87	1316	108	1,81	11,3	0,761
	3	MK-2.2-191129	0,184	7,41	1014	178	0,47	13,3	3,728
	4	MK-2.2-191213	0,209	7,51	1013	189	0,23	10,8	3,457
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	0,000	7,45	983	n.d.	0,11	15,1	4,566
	2	MK-2.3-191115	0,001	7,57	1228	101	0,27	8,3	2,650
	3	MK-2.3-191129	0,001	7,39	1054	73	0,27	9,3	6,032
	4	MK-2.3-191213	0,001	7,48	1017	22	0,21	8,8	4,597
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	0,031	7,62	1084	194	3,53	11,3	0,000
		MK-2.4-191105	0,031	8,11	1011	177	6,72	16,9	0,065
	2	MK-2.4-191111	0,030	8,00	1046	213	3,80	14,2	0,019
		MK-2.4-191115	0,030	7,86	1224	107	3,12	13,6	0,024
	3	MK-2.4-191125	0,033	7,87	1039	307	5,17	15,0	0,460
		MK-2.4-191129	0,033	7,86	1062	288	4,64	15,3	0,033
	4	MK-2.4-191209	0,041	7,81	1019	234	5,34	14,8	0,081
		MK-2.4-191213	0,041	7,95	981	192	5,54	13,1	0,009

			BEGLEITPARAMETER						
			CSB	BSB <sub>5</sub>	Ges. N	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Ges. P
	MW	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	559,0	380,0	81,7	61,7	0,21	0,66	8,81
		MK-Z-191104	616,0	420,0	118,0	61,0	0,04	0,91	9,39
	2	MK-Z-191111	509,0	320,0	78,4	61,3	0,05	0,55	8,30
		MK-Z-191114	514,0	280,0	76,2	58,6	0,02	0,47	8,80
	3	MK-Z-191125	502,0	360,0	78,4	61,3	0,05	0,55	8,30
		MK-Z-191128	427,0	300,0	78,7	60,4	0,02	0,52	8,01
	4	MK-Z-191209	799,0	220,0	77,8	55,3	0,03	0,63	10,60
		MK-Z-191212	439,0	280,0	63,1	45,4	0,03	0,41	7,33
BS_V1	1	MK-1.2-191105	80,5	n.d.	24,0	15,0	0,63	4,62	7,22
	2	MK-1.2-191115	109,0	n.d.	39,7	32,9	0,17	1,61	8,47
	3	MK-1.2-191129	64,6	n.d.	36,4	29,8	0,68	2,82	6,66
	4	MK-1.2-191213	40,3	n.d.	12,8	0,1	0,28	10,30	5,21
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	47,9	n.d.	21,4	4,2	0,54	13,00	6,22
	2	MK-1.3-191115	72,4	n.d.	16,9	10,4	0,32	2,07	8,72
	3	MK-1.3-191129	64,9	n.d.	20,6	4,1	0,86	7,71	7,36
	4	MK-1.3-191213	56,4	n.d.	4,6	1,1	0,14	0,85	7,83
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	64,8	n.d.	n.d.	0,5	0,08	10,30	5,40
		MK-1.4-191105	41,9	n.d.	21,2	11,8	0,98	5,42	6,18
	2	MK-1.4-191111	59,2	n.d.	8,2	0,5	0,11	2,68	6,28
		MK-1.4-191115	95,2	n.d.	36,7	26,4	0,70	2,63	8,43
	3	MK-1.4-191125	57,6	n.d.	25,7	18,7	0,93	3,46	7,02
		MK-1.4-191129	51,5	n.d.	32,2	22,7	1,41	4,01	10,50
	4	MK-1.4-191209	81,2	n.d.	10,4	0,6	0,38	3,61	8,61
		MK-1.4-191213	31,0	n.d.	8,8	0,2	0,30	5,99	5,15
BS_V2	1	MK-2.2-191105	30,4	n.d.	15,9	0,1	0,03	8,70	4,79
	2	MK-2.2-191115	99,5	n.d.	42,9	34,9	0,22	2,71	7,01
	3	MK-2.2-191129	35,4	n.d.	18,7	2,9	0,35	11,40	4,66
	4	MK-2.2-191213	49,3	n.d.	14,3	0,4	1,56	9,72	4,25
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	43,4	n.d.	11,3	1,5	0,36	4,58	6,18
	2	MK-2.3-191115	119,0	n.d.	29,0	20,7	0,89	2,58	11,40
	3	MK-2.3-191129	57,6	n.d.	7,2	1,2	0,03	0,38	8,07
	4	MK-2.3-191213	84,1	n.d.	4,5	0,8	0,29	1,49	7,28
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	40,8	n.d.	n.d.	3,4	0,24	6,85	6,12
		MK-2.4-191105	33,4	n.d.	12,6	1,7	0,38	7,66	5,64
	2	MK-2.4-191111	36,9	n.d.	14,7	4,8	0,44	5,91	6,50
		MK-2.4-191115	57,0	n.d.	29,7	21,3	0,55	4,25	6,28
	3	MK-2.4-191125	33,6	n.d.	15,1	2,8	0,93	9,19	5,41
		MK-2.4-191129	35,1	n.d.	14,7	2,9	0,98	7,41	5,250
	4	MK-2.4-191209	33,5	n.d.	13,7	1,0	1,14	8,55	5,010
		MK-2.4-191213	33,1	n.d.	9,9	0,3	0,80	6,87	4,690

			SCHWERMETALLE			
			Blei (Pb)	Cadmium (Cd)	Nickel (Ni)	Quecksilber (Hg)
	MW	ID-ges	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	0,006	< 0,001	0,006	< 0,0001
		MK-Z-191104	0,006	< 0,001	0,011	< 0,0001
	2	MK-Z-191111	< 0,005	< 0,001	0,006	0,0002
		MK-Z-191114	< 0,005	< 0,001	0,011	0,0002
	3	MK-Z-191125	0,006	< 0,001	0,013	0,0002
		MK-Z-191128	0,009	< 0,001	0,01	< 0,0001
	4	MK-Z-191209	0,006	< 0,001	0,014	< 0,0001
		MK-Z-191212	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
BS_V1	1	MK-1.2-191105	0,018	< 0,001	0,016	< 0,0001
	2	MK-1.2-191115	0,016	< 0,001	0,02	0,0002
	3	MK-1.2-191129	0,009	< 0,001	0,011	0,0004
	4	MK-1.2-191213	0,029	0,001	0,104	0,0006
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	0,038	0,001	0,077	0,0004
	2	MK-1.3-191115	0,035	0,001	0,075	0,0006
	3	MK-1.3-191129	0,043	0,001	0,033	0,0017
	4	MK-1.3-191213	0,041	0,001	0,061	0,0006
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	< 0,005	< 0,001	0,05	< 0,0001
		MK-1.4-191105	< 0,005	< 0,001	0,004	< 0,0001
	2	MK-1.4-191111	< 0,005	< 0,001	0,003	< 0,0001
		MK-1.4-191115	< 0,005	< 0,001	0,015	< 0,0001
	3	MK-1.4-191125	< 0,005	< 0,001	0,026	< 0,0001
		MK-1.4-191129	0,005	< 0,001	0,003	0,0001
	4	MK-1.4-191209	0,007	< 0,001	0,012	< 0,0001
		MK-1.4-191213	< 0,005	< 0,001	< 0,003	< 0,0001
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,042	0,001	0,035	0,0005
	2	MK-2.2-191115	0,012	< 0,001	0,013	0,0002
	3	MK-2.2-191129	0,053	0,002	0,038	0,0016
	4	MK-2.2-191213	0,025	0,001	0,018	0,0005
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	0,073	0,003	0,099	0,0015
	2	MK-2.3-191115	0,034	0,001	0,032	0,0005
	3	MK-2.3-191129	0,075	0,002	0,05	0,0012
	4	MK-2.3-191213	0,034	0,001	0,043	0,0006
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
		MK-2.4-191105	< 0,005	< 0,001	0,003	< 0,0001
	2	MK-2.4-191111	< 0,005	< 0,001	0,004	< 0,0001
		MK-2.4-191115	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
	3	MK-2.4-191125	< 0,005	< 0,001	0,006	< 0,0001
		MK-2.4-191129	< 0,005	< 0,001	0,002	< 0,0001
	4	MK-2.4-191209	< 0,005	< 0,001	0,181	< 0,0001
		MK-2.4-191213	< 0,005	< 0,001	< 0,003	< 0,0001

			ARZNEISTOFFE					
			Carbamazepin	Ciprofloxacin	Coffein	Diclofenac	Gabapentin	Ibuprofen
	MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	0,500	0,590	126,00	1,60	13,00	21,00
		MK-Z-191104	0,67	0,40	137,00	1,60	12,00	18,00
	2	MK-Z-191111	0,87	0,88	74,00	2,80	16,00	30,00
		MK-Z-191114	0,60	0,85	91,00	2,80	12,00	27,00
	3	MK-Z-191125	0,67	0,46	80,00	2,70	14,00	30,00
		MK-Z-191128	0,76	0,49	206,00	2,40	10,00	30,00
	4	MK-Z-191209	0,48	1,20	188,00	3,80	9,90	32,00
		MK-Z-191212	0,52	0,93	176,00	2,10	7,20	27,00
BS_V1	1	MK-1.2-191105	0,56	0,30	1,80	2,50	5,50	2,00
	2	MK-1.2-191115	0,56	0,50	16,00	2,60	8,90	13,00
	3	MK-1.2-191129	0,71	0,70	5,90	2,90	6,30	4,70
	4	MK-1.2-191213	0,65	0,92	< 0,02	3,30	4,50	0,08
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	0,60	0,35	0,08	2,80	2,80	18,00
	2	MK-1.3-191115	0,60	0,56	0,54	2,40	4,30	2,80
	3	MK-1.3-191129	0,62	1,20	1,10	3,10	5,80	9,50
	4	MK-1.3-191213	0,64	0,97	< 0,02	4,00	2,10	11,00
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	0,57	0,14	0,07	2,50	2,20	0,84
		MK-1.4-191105	0,54	0,17	3,90	2,20	4,70	2,00
	2	MK-1.4-191111	0,64	0,22	0,05	2,40	1,70	< 0,05
		MK-1.4-191115	0,69	0,40	14,00	2,60	8,20	11,00
	3	MK-1.4-191125	0,51	0,31	7,20	2,40	7,70	6,80
		MK-1.4-191129	0,58	0,34	8,20	2,80	6,20	6,10
	4	MK-1.4-191209	0,59	0,19	0,04	3,30	2,00	1,10
		MK-1.4-191213	0,68	0,20	0,18	2,80	3,00	0,47
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,59	0,22	0,05	2,70	1,70	< 0,05
	2	MK-2.2-191115	0,55	0,68	15,00	2,40	1,60	13,00
	3	MK-2.2-191129	0,61	0,88	0,08	3,10	1,60	0,58
	4	MK-2.2-191213	0,61	1,20	0,12	3,50	5,60	0,55
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	0,55	0,29	0,10	2,80	0,64	32,00
	2	MK-2.3-191115	0,64	0,64	1,50	2,50	1,30	6,20
	3	MK-2.3-191129	0,69	1,20	0,03	3,30	1,10	6,90
	4	MK-2.3-191213	0,59	1,50	0,13	3,10	2,40	0,66
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	0,61	0,16	0,67	2,50	3,10	0,32
		MK-2.4-191105	0,66	0,14	0,49	2,40	2,30	< 0,05
	2	MK-2.4-191111	0,61	0,25	1,70	2,40	4,10	1,60
		MK-2.4-191115	0,62	0,42	2,70	2,50	6,30	5,40
	3	MK-2.4-191125	0,52	0,25	0,65	2,10	3,50	1,30
		MK-2.4-191129	0,69	0,19	0,42	2,60	2,20	0,17
	4	MK-2.4-191209	0,51	0,22	1,20	2,80	4,90	0,94
		MK-2.4-191213	0,53	0,25	0,51	2,30	4,20	< 0,05

			ARZNEISTOFFE					
			Iopamidol	Metformin	Metoprolol	Oxytetracyclin	Sulfamethoxazol	Trimethoprim
MW	ID-ges		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	< 0,04	226,00	9,10	< 0,02	1,80	0,50
		MK-Z-191104	< 0,04	227,00	9,20	< 0,02	1,30	0,44
	2	MK-Z-191111	< 0,04	132,00	8,40	< 0,02	1,20	0,49
		MK-Z-191114	< 0,04	140,00	8,80	< 0,02	1,60	0,49
	3	MK-Z-191125	< 0,04	140,00	8,20	< 0,02	0,73	0,31
		MK-Z-191128	0,16	183,00	6,90	< 0,02	0,79	0,50
	4	MK-Z-191209	< 0,04	187,00	6,20	< 0,02	1,40	0,92
		MK-Z-191212	1,30	197,00	5,70	< 0,02	1,20	0,69
BS_V1	1	MK-1.2-191105	< 0,04	5,80	4,60	< 0,02	1,20	0,37
	2	MK-1.2-191115	< 0,04	32,00	5,20	< 0,02	1,70	0,33
	3	MK-1.2-191129	< 0,04	9,40	3,90	< 0,02	0,62	0,33
	4	MK-1.2-191213	0,89	0,02	1,70	< 0,02	0,48	0,61
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	< 0,04	0,13	1,90	< 0,02	0,65	0,39
	2	MK-1.3-191115	< 0,04	1,30	2,40	< 0,02	0,67	0,34
	3	MK-1.3-191129	< 0,04	1,40	3,50	< 0,02	0,41	0,31
	4	MK-1.3-191213	0,50	< 0,02	0,69	< 0,02	0,22	0,44
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	< 0,04	0,49	2,10	< 0,02	1,20	0,30
		MK-1.4-191105	< 0,04	9,70	3,70	< 0,02	0,80	0,31
	2	MK-1.4-191111	< 0,04	0,28	1,30	< 0,02	0,64	0,34
		MK-1.4-191115	< 0,04	24,00	5,20	< 0,02	0,87	0,44
	3	MK-1.4-191125	< 0,04	18,00	4,10	< 0,02	0,66	0,27
		MK-1.4-191129	< 0,04	11,00	3,60	< 0,02	0,38	0,30
	4	MK-1.4-191209	< 0,04	0,20	1,00	< 0,02	0,27	0,31
		MK-1.4-191213	1,10	1,10	1,30	< 0,02	0,57	0,43
BS_V2	1	MK-2.2-191105	< 0,04	0,12	1,90	< 0,02	0,78	0,32
	2	MK-2.2-191115	< 0,04	2,40	6,60	< 0,02	1,70	0,46
	3	MK-2.2-191129	< 0,04	0,04	1,90	< 0,02	0,21	0,42
	4	MK-2.2-191213	0,79	0,06	2,70	< 0,02	0,63	0,96
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	< 0,04	0,07	0,52	< 0,02	0,50	0,30
	2	MK-2.3-191115	< 0,04	3,80	4,40	< 0,02	0,82	0,40
	3	MK-2.3-191129	< 0,04	0,05	1,00	< 0,02	0,16	0,44
	4	MK-2.3-191213	0,76	0,03	1,00	< 0,02	0,32	0,84
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	< 0,04	2,70	2,90	< 0,02	1,10	0,34
		MK-2.4-191105	< 0,04	2,80	2,40	< 0,02	0,75	0,32
	2	MK-2.4-191111	< 0,04	3,70	2,30	< 0,02	0,64	0,33
		MK-2.4-191115	< 0,04	26,00	4,50	< 0,02	1,10	0,48
	3	MK-2.4-191125	< 0,04	3,10	2,50	< 0,02	0,41	0,26
		MK-2.4-191129	< 0,04	1,20	1,80	< 0,02	0,22	0,32
	4	MK-2.4-191209	< 0,04	1,80	2,60	< 0,02	0,40	0,56
		MK-2.4-191213	0,90	1,70	2,40	< 0,02	0,59	0,52

			PFLANZENSCHUTZMITTEL						
			Aclonifen	Bifenox	Cybutryn (Tgar)	Cypermethrin	Dichlorvos	Dicofol	Diuron
	MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-Z-191104	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	2	MK-Z-191111	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-Z-191114	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	3	MK-Z-191125	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-Z-191128	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
	4	MK-Z-191209	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-Z-191212	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,02
BS_V1	1	MK-1.2-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-1.2-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-1.2-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-1.2-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-1.3-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-1.3-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-1.3-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-1.4-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-1.4-191111	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-1.4-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-1.4-191125	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-1.4-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-1.4-191209	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-1.4-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
BS_V2	1	MK-2.2-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-2.2-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-2.2-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-2.2-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-2.3-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-2.3-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-2.3-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-2.4-191105	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	2	MK-2.4-191111	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-2.4-191115	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	3	MK-2.4-191125	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-2.4-191129	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
	4	MK-2.4-191209	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02
		MK-2.4-191213	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,04	< 0,05	< 0,02	< 0,02

			PFLANZENSCHUTZMITTEL						
			Glyphosat	Imidacloprid	Isoproturon	Quinoxifen	Terbuthylazin	Terbutryn	Triclosan
MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Zulauf	1	MK-Z-191101	0,55	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,09
		MK-Z-191104	14,70	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	2	MK-Z-191111	4,62	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,31
		MK-Z-191114	6,03	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,11	0,08
	3	MK-Z-191125	5,90	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,05
		MK-Z-191128	3,93	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	4	MK-Z-191209	6,83	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-Z-191212	29,00	0,07	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
BS_V1	1	MK-1.2-191105	20,30	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,07
	2	MK-1.2-191115	7,11	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,04	< 0,05
	3	MK-1.2-191129	11,00	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	4	MK-1.2-191213	60,80	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,20
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	6,03	0,06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,08
	2	MK-1.3-191115	9,45	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,10
	3	MK-1.3-191129	11,40	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,16
	4	MK-1.3-191213	26,30	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,18
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	4,49	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-1.4-191105	12,20	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	2	MK-1.4-191111	4,06	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-1.4-191115	5,32	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,04	< 0,05
	3	MK-1.4-191125	4,09	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,05
		MK-1.4-191129	3,86	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	4	MK-1.4-191209	3,20	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-1.4-191213	5,68	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
BS_V2	1	MK-2.2-191105	23,40	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,07
	2	MK-2.2-191115	3,25	< 0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,04	< 0,05
	3	MK-2.2-191129	16,60	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,13
	4	MK-2.2-191213	37,20	0,06	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,19
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	36,20	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	2	MK-2.3-191115	11,30	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	0,27
	3	MK-2.3-191129	13,40	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,10
	4	MK-2.3-191213	42,90	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	3,41	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-2.4-191105	6,74	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	2	MK-2.4-191111	3,84	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-2.4-191115	2,21	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,04	< 0,05
	3	MK-2.4-191125	3,07	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,05
		MK-2.4-191129	3,77	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
	4	MK-2.4-191209	3,61	0,04	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05
		MK-2.4-191213	18,80	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05

			PAKs								
			Acenaphthen	Acenaphthylen	Anthracen	Benzo[a]anthra	Benzo[a]pyren	Benzo[b]fluorai	Benzo[ghi]pery	Benzo[k]fluorai	
	MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	
Zulauf	1	MK-Z-191101	< 0,01	< 0,01	0,24	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-Z-191104	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
	2	MK-Z-191111	0,01	< 0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
		MK-Z-191114	< 0,01	0,04	< 0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	< 0,01
	3	MK-Z-191125	0,14	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
		MK-Z-191128	< 0,01	< 0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	4	MK-Z-191209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,02	< 0,01	< 0,01
		MK-Z-191212	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BS_V1	1	MK-1.2-191105	0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	2	MK-1.2-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	
	3	MK-1.2-191129	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	4	MK-1.2-191213	0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	0,02	< 0,01	0,01	< 0,01	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	
	2	MK-1.3-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	
	3	MK-1.3-191129	0,01	< 0,01	0,02	0,05	0,03	0,04	0,02	0,01	
	4	MK-1.3-191213	0,04	< 0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	< 0,01	
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-1.4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	2	MK-1.4-191111	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-1.4-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	3	MK-1.4-191125	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	
		MK-1.4-191129	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	4	MK-1.4-191209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-1.4-191213	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,02	< 0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	
	2	MK-2.2-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	3	MK-2.2-191129	0,03	< 0,01	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	
	4	MK-2.2-191213	0,05	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	< 0,01	
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	0,02	< 0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	< 0,01	
	2	MK-2.3-191115	0,01	< 0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	< 0,01	
	3	MK-2.3-191129	0,01	< 0,01	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01	
	4	MK-2.3-191213	0,04	< 0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	< 0,01	
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-2.4-191105	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	2	MK-2.4-191111	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-2.4-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	3	MK-2.4-191125	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	
		MK-2.4-191129	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
	4	MK-2.4-191209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	
		MK-2.4-191213	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	

			PAKs							
			Chrysen	Dibenzo[ah]jant	Fluoranthren	Fluoren	Indeno[1,2,3-cd]	Naphthalin	Phenanthren	Pyren
	MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,14	0,01	0,03
		MK-Z-191104	< 0,01	< 0,01	0,05	0,01	< 0,01	0,12	0,24	0,04
	2	MK-Z-191111	0,04	< 0,01	0,16	0,02	0,03	0,20	0,21	0,16
		MK-Z-191114	0,03	< 0,01	0,05	< 0,05	< 0,01	0,12	0,10	0,04
	3	MK-Z-191125	< 0,02	< 0,02	0,05	0,09	< 0,02	0,45	0,14	0,03
		MK-Z-191128	0,03	< 0,01	0,10	0,02	< 0,01	0,10	0,22	0,11
	4	MK-Z-191209	0,01	< 0,01	0,05	0,02	< 0,01	0,07	0,15	0,08
		MK-Z-191212	0,01	< 0,01	0,03	0,03	< 0,01	0,04	0,08	0,03
BS_V1	1	MK-1.2-191105	0,02	< 0,01	0,10	0,03	< 0,01	0,07	0,29	0,07
	2	MK-1.2-191115	0,02	< 0,01	0,07	0,01	< 0,01	0,04	0,13	0,05
	3	MK-1.2-191129	< 0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	0,01	0,08	0,04
	4	MK-1.2-191213	0,02	< 0,01	0,10	0,04	< 0,01	0,03	0,15	0,09
Üss_V1	1	MK-1.3-191105	0,02	< 0,01	0,14	0,04	< 0,01	0,04	0,39	0,09
	2	MK-1.3-191115	0,03	< 0,01	0,10	0,02	< 0,01	0,02	0,16	0,07
	3	MK-1.3-191129	0,07	< 0,01	0,30	0,06	0,01	0,07	0,43	0,30
	4	MK-1.3-191213	0,03	0,01	0,17	0,07	< 0,01	0,07	0,27	0,16
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	0,18	< 0,01
		MK-1.4-191105	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,20	0,13	< 0,01
	2	MK-1.4-191111	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,02	< 0,01
		MK-1.4-191115	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,03	< 0,01
	3	MK-1.4-191125	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-1.4-191129	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,02	0,09	0,02
	4	MK-1.4-191209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,01
		MK-1.4-191213	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,02	< 0,01
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,03	< 0,01	0,17	0,04	< 0,01	0,06	0,43	0,11
	2	MK-2.2-191115	0,01	< 0,01	0,05	< 0,01	< 0,01	0,04	0,10	0,04
	3	MK-2.2-191129	0,06	< 0,01	0,36	0,10	0,02	0,09	0,60	0,38
	4	MK-2.2-191213	0,02	0,01	0,19	0,06	< 0,01	0,05	0,32	0,17
Üss_V2	1	MK-2.3-191105	0,02	< 0,01	0,18	0,06	< 0,01	0,07	0,49	0,15
	2	MK-2.3-191115	0,02	< 0,01	0,14	0,04	< 0,01	0,07	0,29	0,10
	3	MK-2.3-191129	0,06	< 0,01	0,30	0,06	< 0,01	0,07	0,40	0,37
	4	MK-2.3-191213	0,03	< 0,01	0,20	0,07	< 0,01	0,06	0,32	0,19
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,14	< 0,01
		MK-2.4-191105	< 0,01	< 0,01	0,02	0,01	< 0,01	0,02	0,21	< 0,01
	2	MK-2.4-191111	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,03	< 0,01
		MK-2.4-191115	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04	0,01
	3	MK-2.4-191125	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,02
		MK-2.4-191129	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01
	4	MK-2.4-191209	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
		MK-2.4-191213	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,03	< 0,01

			SONSTIGE			
			Acesulfam-K	Bisphenol A	Benzotriazol	PFOS
	MW	ID-ges	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Zulauf	1	MK-Z-191101	49,00	0,73	25,00	< 0,05
		MK-Z-191104	48,00	0,62	20,00	< 0,05
	2	MK-Z-191111	41,00	0,52	19,00	< 0,05
		MK-Z-191114	45,00	0,80	23,00	< 0,05
	3	MK-Z-191125	50,00	0,67	18,00	< 0,05
		MK-Z-191128	41,00	0,73	24,00	< 0,05
	4	MK-Z-191209	46,00	0,58	14,00	< 0,05
		MK-Z-191212	35,00	0,52	14,00	< 0,05
BS_V1	1	MK-1.2-191105	23,00	0,26	18,00	< 0,05
	2	MK-1.2-191115	26,00	0,47	18,00	< 0,05
	3	MK-1.2-191129	23,00	0,34	13,00	< 0,05
	4	MK-1.2-191213	4,00	0,16	8,70	< 0,05
ÜSS_V1	1	MK-1.3-191105	6,80	0,08	16,00	< 0,05
	2	MK-1.3-191115	8,10	0,26	14,00	< 0,05
	3	MK-1.3-191129	22,00	0,48	12,00	< 0,05
	4	MK-1.3-191213	0,59	0,07	6,00	< 0,05
Ab_V1	1	MK-1.4-191101	3,70	< 0,05	14,00	< 0,05
		MK-1.4-191105	18,00	0,12	15,00	< 0,05
	2	MK-1.4-191111	0,95	0,05	9,50	< 0,05
		MK-1.4-191115	27,00	0,23	18,00	< 0,05
	3	MK-1.4-191125	22,00	0,14	16,00	< 0,05
		MK-1.4-191129	21,00	0,19	12,00	< 0,05
	4	MK-1.4-191209	2,00	< 0,05	7,60	< 0,05
		MK-1.4-191213	4,70	< 0,05	4,90	< 0,05
BS_V2	1	MK-2.2-191105	0,71	< 0,05	14,00	< 0,05
	2	MK-2.2-191115	34,00	0,47	20,00	< 0,05
	3	MK-2.2-191129	0,18	0,17	11,00	< 0,05
	4	MK-2.2-191213	16,00	0,33	14,00	< 0,05
ÜSS_V2	1	MK-2.3-191105	< 0,05	< 0,05	13,00	0,050
	2	MK-2.3-191115	23,00	0,57	19,00	< 0,05
	3	MK-2.3-191129	0,12	0,17	11,00	< 0,05
	4	MK-2.3-191213	7,60	0,23	12,00	< 0,05
Ab_V2	1	MK-2.4-191101	6,40	0,05	16,00	< 0,05
		MK-2.4-191105	5,20	< 0,05	13,00	< 0,05
	2	MK-2.4-191111	6,70	0,05	9,90	< 0,05
		MK-2.4-191115	20,00	0,20	15,00	< 0,05
	3	MK-2.4-191125	10,00	0,06	13,00	< 0,05
		MK-2.4-191129	4,60	0,07	6,70	< 0,05
	4	MK-2.4-191209	22,00	0,08	8,90	< 0,05
		MK-2.4-191213	16,00	0,11	8,40	< 0,05

## 1.2 Biodegradationskonstanten

Ermittelt nach Gleichung 1b, Abs, 2.1. Für fehlende Parameter liegen keine Daten vor.

$k_{\text{bio}}$ [L/(g TS * d)]	Versuchsanlage 1				Versuchsanlage 2			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Carbamazepin	0,27	0,00	0,75	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
Imidacloprid	0,00	0,00	0,60	0,29	0,15	0,00	0,07	0,15
Nickel (Ni)	12,30	0,00	19,39		9,67	1,45	6,94	
Ciprofloxacin	1,57	0,76	2,22	2,06	0,71	0,67	1,15	2,00
Diclofenac	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00
Gabapentin	0,90	0,24	1,24	0,34	0,46	0,29	0,38	0,18
Metoprolol	0,83	0,32	1,72	0,52	0,36	0,50	0,35	0,27
Sulfamethoxazol	0,53	0,45	2,04	0,24	0,20	0,25	0,37	0,24
Trimethoprim	0,47	0,08	1,39	0,22	0,14	0,01	0,18	0,16
Glyphosat	0,17	0,15	0,10	2,11	1,09	2,32	0,03	0,31
Naphthalin	0,00	3,13	9,72	2,55	1,77			2,11
Phenanthren	1,47	3,20	6,93	4,62	0,10	2,85	4,73	2,49
Bisphenol A	1,64	1,11	6,37			2,01	1,33	1,04
Benzotriazol	0,36	0,18	1,86	0,54	0,19	0,37	0,56	0,27
Coffein	2,18	0,82	4,91		1,49	2,06	1,10	1,60
Ibuprofen	13,20	0,47	5,47	22,70		1,30	35,67	
Metformin	1,92	0,78	4,25		0,99	0,73	0,87	1,05
Acesulfam-K	0,81	0,28	1,84	0,52		0,66	0,37	0,25

### 1.3 Sorptionskoeffizienten

Ermittelt nach Gleichung 5, Abs. 2.2. Für fehlende Parameter liegen keine Daten vor.

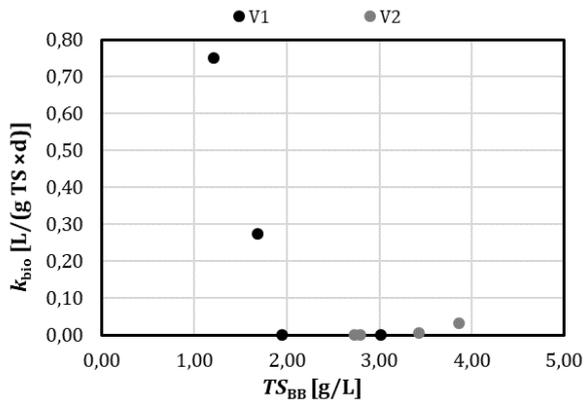
$k_d$ [L/kg TS]	Versuchsanlage 1				Versuchsanlage 2			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
<b>Blei (Pb)</b>			11544					
<b>Nickel (Ni)</b>	11562	2096	14765		7227	2013	4145	
<b>Quecksilber (Hg)</b>			22819					
<b>Carbamazepin</b>	667	365	1435	216	183	390	166	242
<b>Ciprofloxacin</b>	1237	587	4737	1114	454	575	1047	1305
<b>Coffein</b>	12	16	180		45	210	12	55
<b>Diclofenac</b>	764	387	1486	328	256	377	210	293
<b>Gabapentin</b>	358	220	1256	161	61	78	83	124
<b>Ibuprofen</b>	5405	107	2090	5374		433	6729	
<b>Iopamidol</b>				104				184
<b>Metformin</b>	8	23	171		5	55	7	4
<b>Metoprolol</b>	308	194	1305	122	47	369	92	91
<b>Sulfamethoxazol</b>	488	323	1448	89	146	281	121	118
<b>Trimethoprim</b>	756	324	1387	235	205	314	228	351
<b>Glyphosat</b>	297	745	3964	1063	1176	1929	589	496
<b>Imidacloprid</b>	901	419	1342	287	292	377	166	218
<b>Terbutryn</b>						189		
<b>Benzo[a]anthracen</b>							663	
<b>Fluoranthren</b>	8408		20134		1971	2642		
<b>Fluoren</b>					1314			
<b>Naphthalin</b>	120	839	4698	1607	767			1305
<b>Phenanthren</b>	1802	2236	6413	3100	511	2736	2210	2320
<b>Pyren</b>			20134			3774		
<b>Acesulfam-K</b>	227	126	1406	29		434	4	103
<b>Bisphenol A</b>	400	474	3391			1075	403	455
<b>Benzotriazol</b>	641	326	1342	281	219	478	272	311

## 2 Grafische Zusammenstellung der Biodegradationskonstanten in Abhängigkeiten der Betriebsparameter

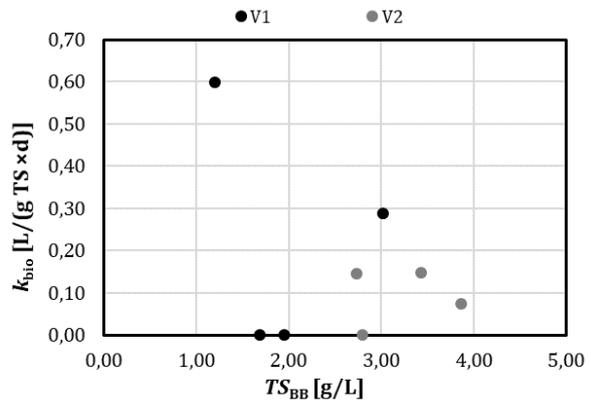
### 2.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes in der Belebung $TS_{BB}$

Stoffgruppe I

A: Carbamazepin

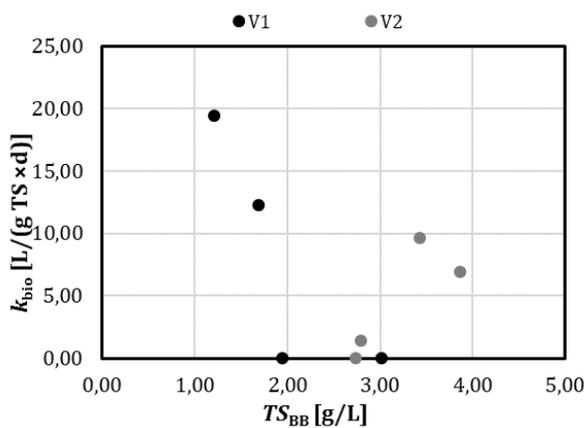


B: Imidacloprid

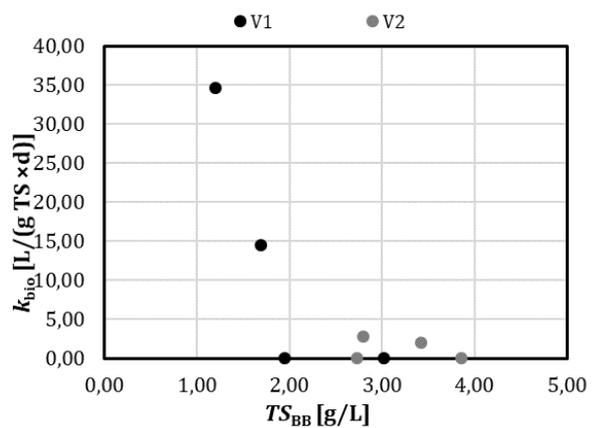


Stoffgruppe II

A: Nickel

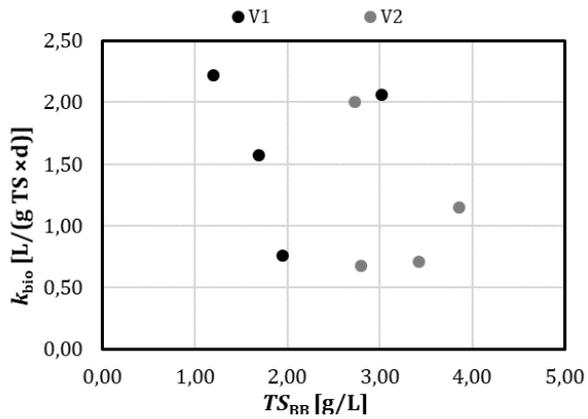


B: Flouranthen

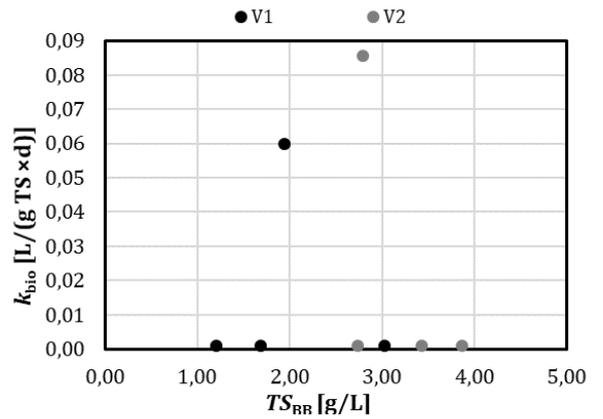


Stoffgruppe III

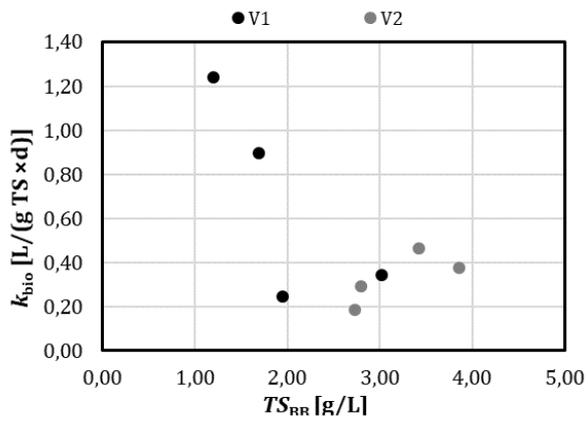
A: Ciprofloxacin



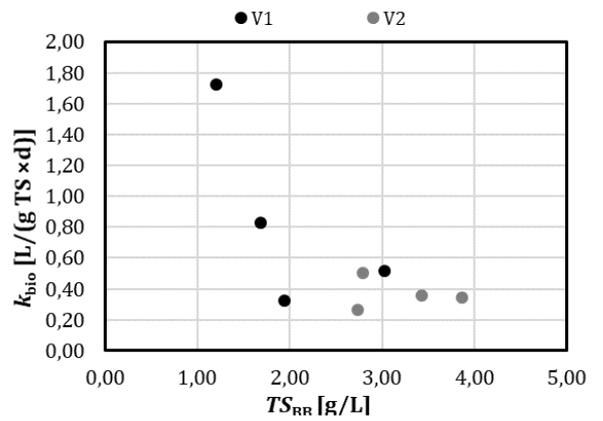
B: Diclofenac



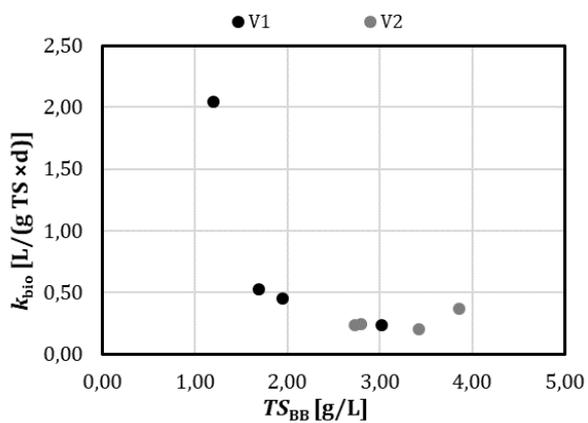
C: Gabapentin



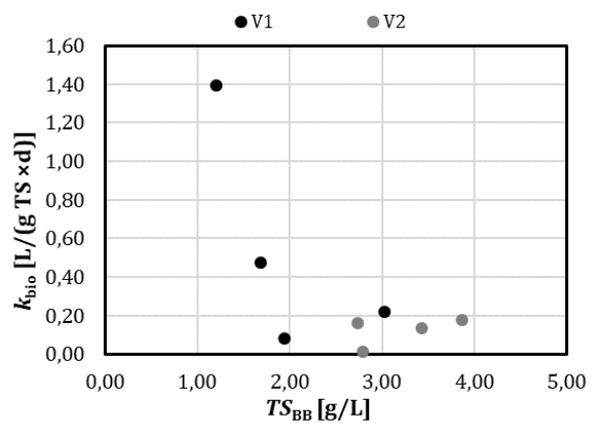
D: Metoprolol



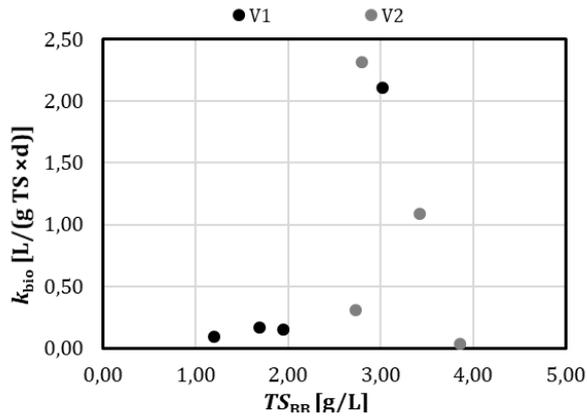
E: Sulfamethoxazol



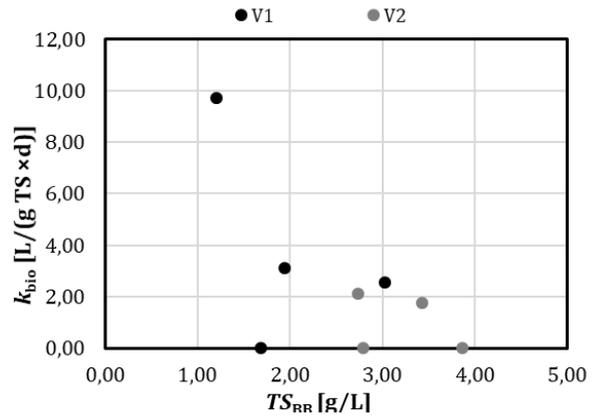
F: Trimethoprim



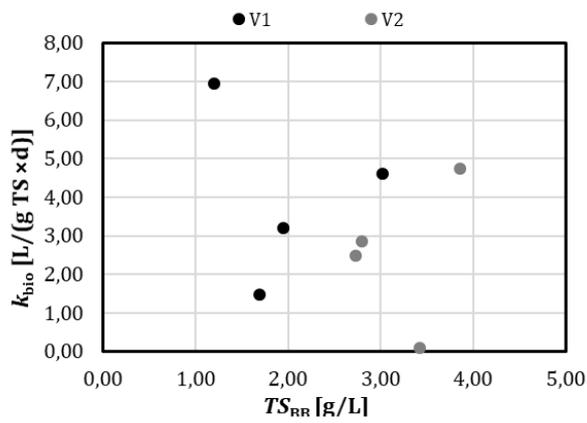
**G: Glyphosat**



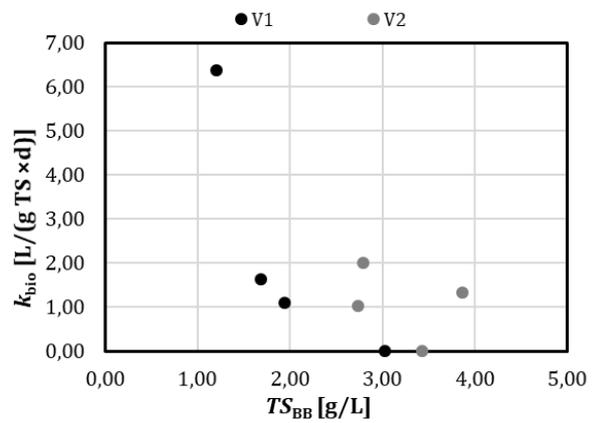
**H: Naphthalin**



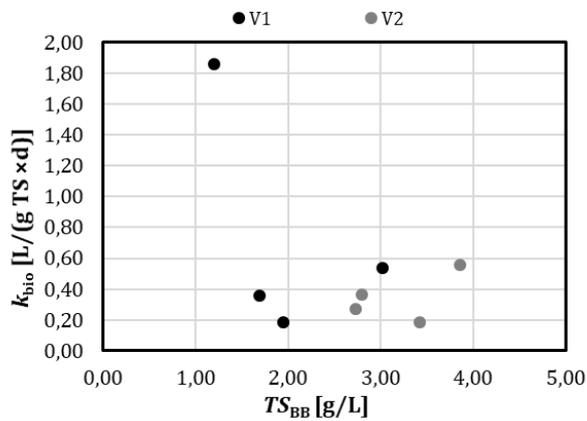
**I: Phenanthren**



**J: Bisphenol A**



**K: Benzotriazol**

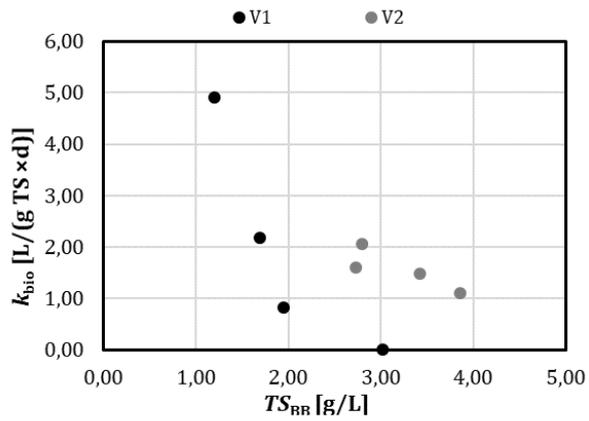


## Stoffgruppe IV

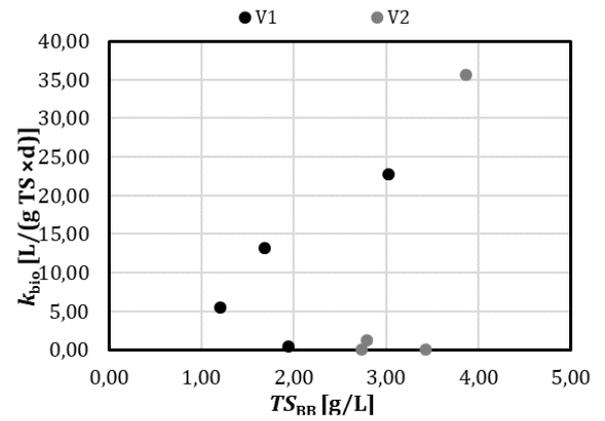
- keine Daten -

## Stoffgruppe V

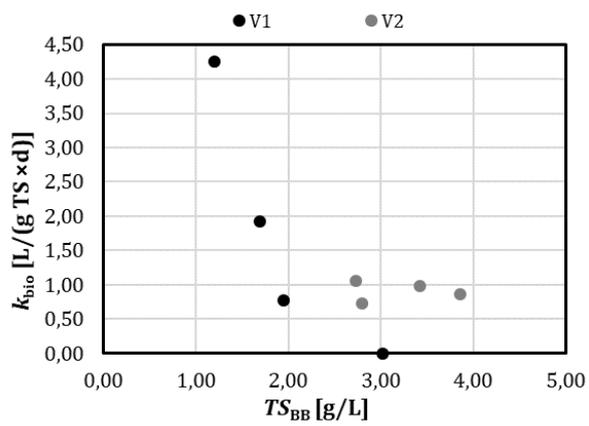
A: Coffein



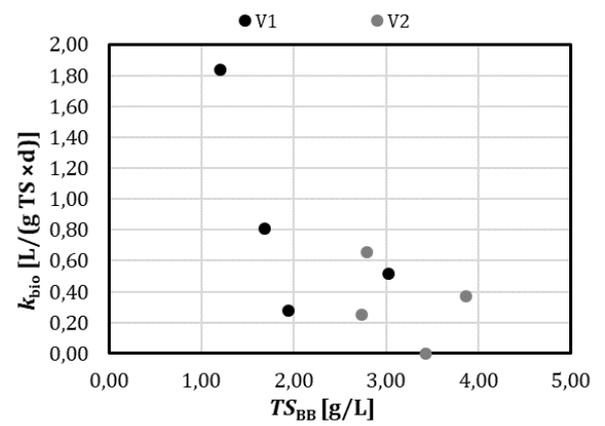
B: Ibuprofen



C: Metformin



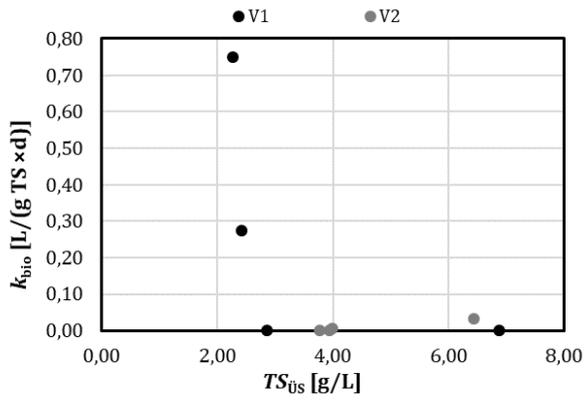
D: Acesulfam-K



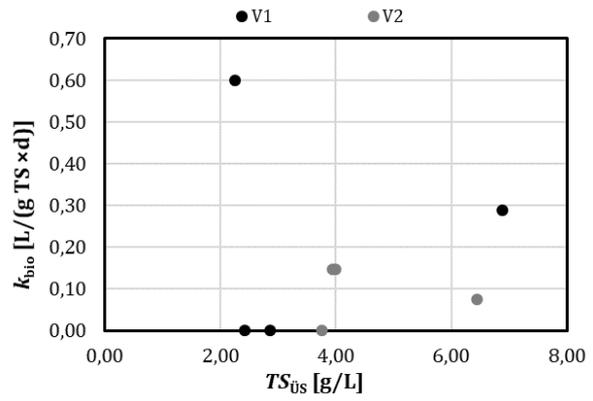
## 2.2 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes im Überschussschlamm $TS_{\text{ÜS}}$

### Stoffgruppe I

**A: Carbamazepin**

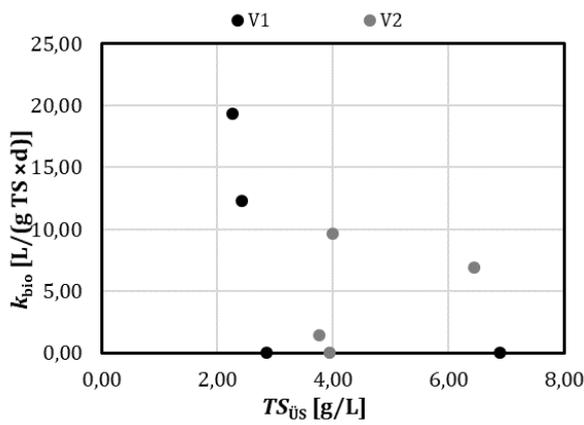


**B: Imidacloprid**

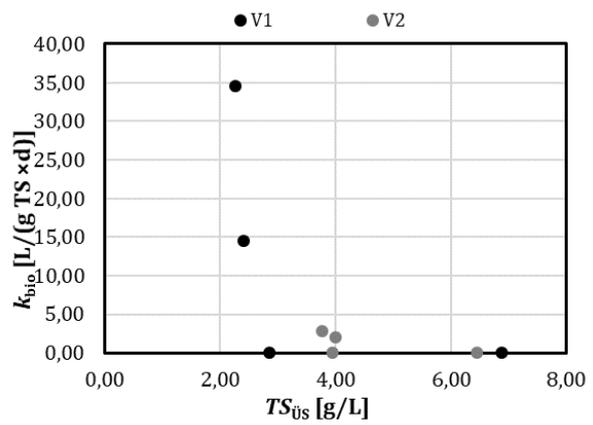


### Stoffgruppe II

**A: Nickel**

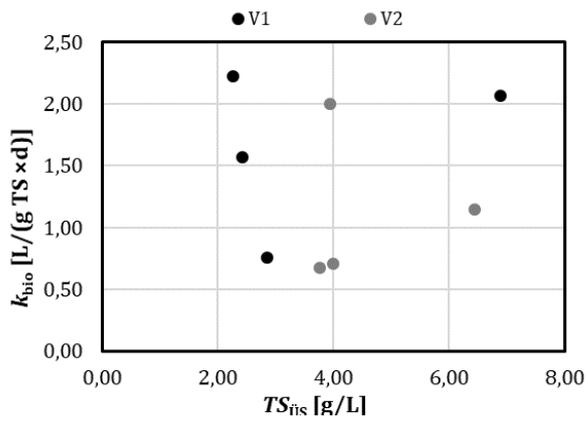


**B: Flouranthen**

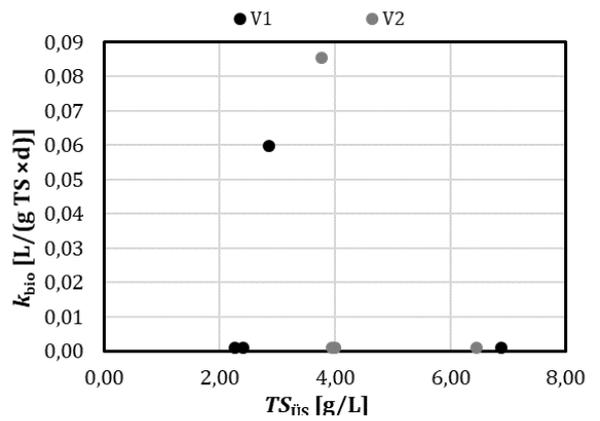


Stoffgruppe III

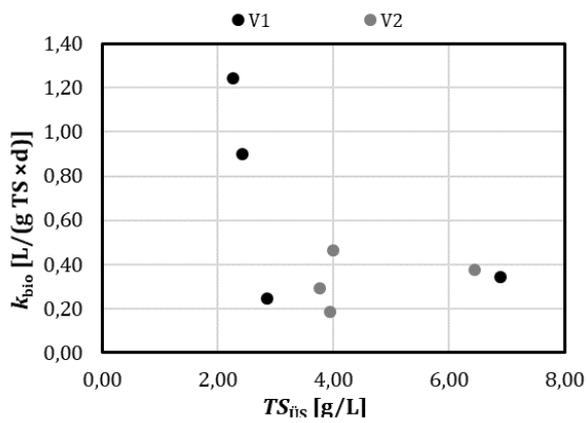
A: Ciprofloxacin



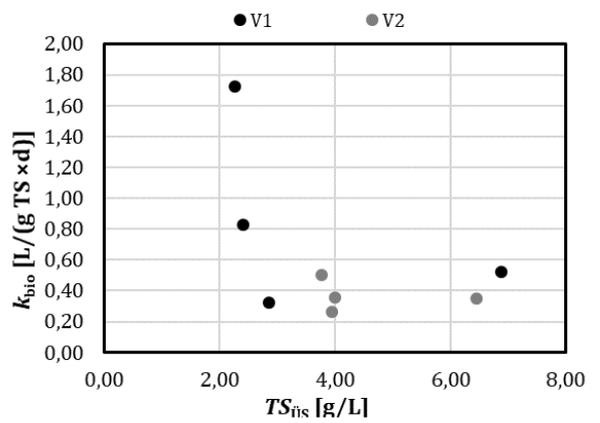
B: Diclofenac



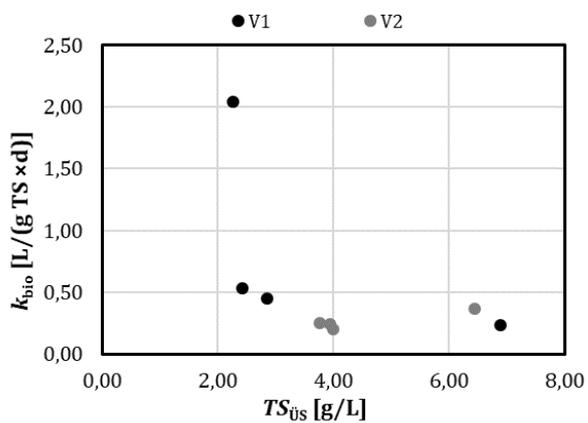
C: Gabapentin



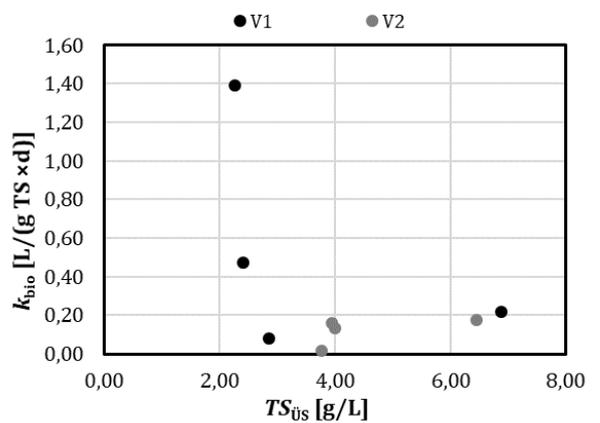
D: Metoprolol



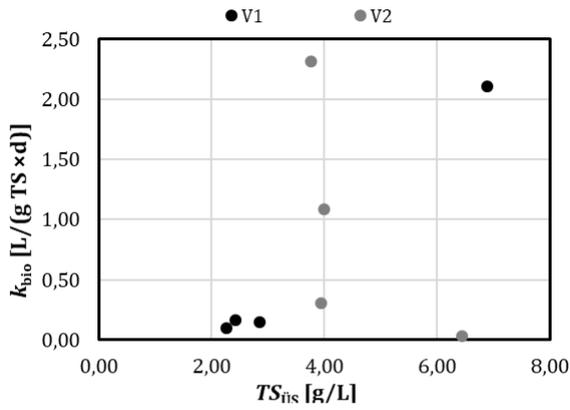
E: Sulfamethoxazol



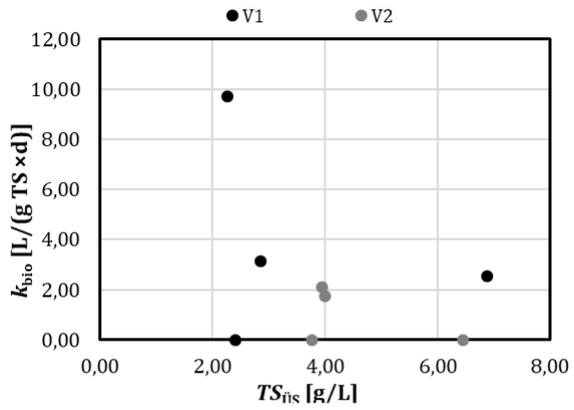
F: Trimethoprim



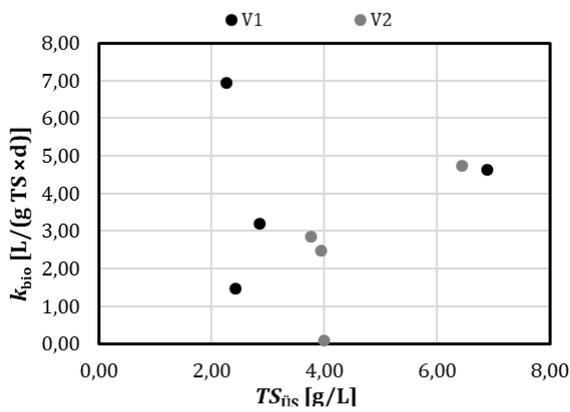
**G: Glyphosat**



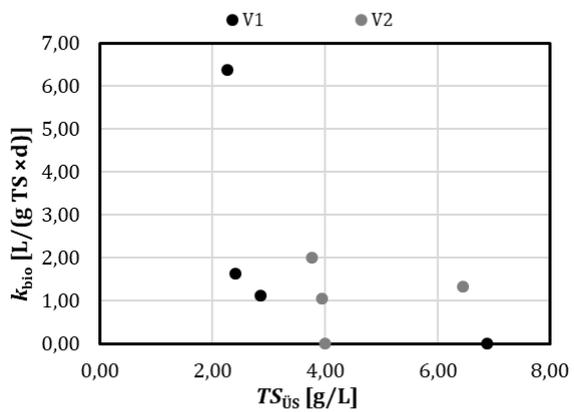
**H: Naphthalin**



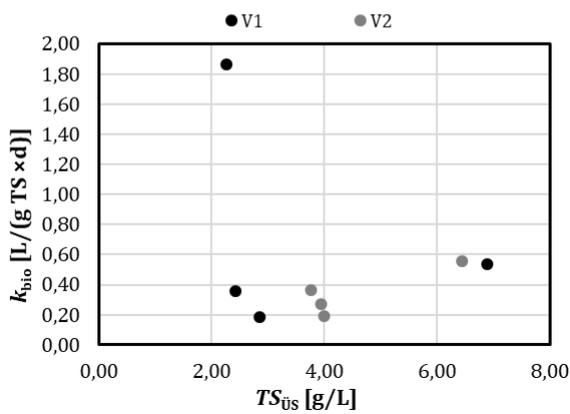
**I: Phenanthren**



**J: Bisphenol A**



**K: Benzotriazol**

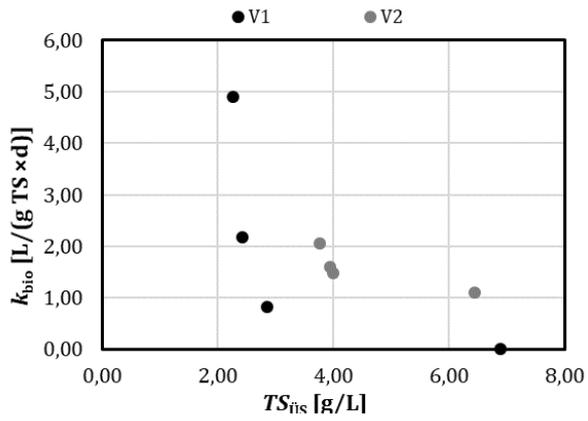


*Stoffgruppe IV*

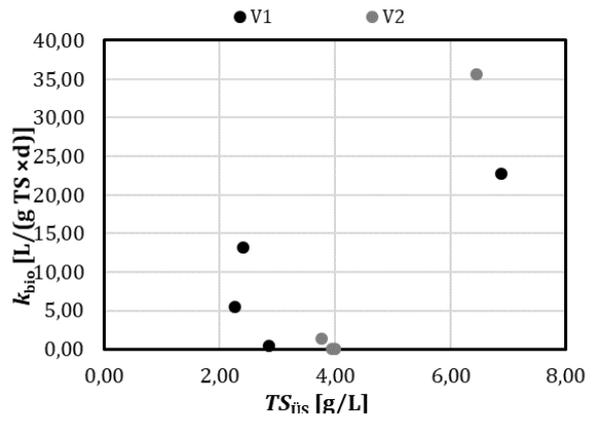
- keine Daten -

Stoffgruppe V

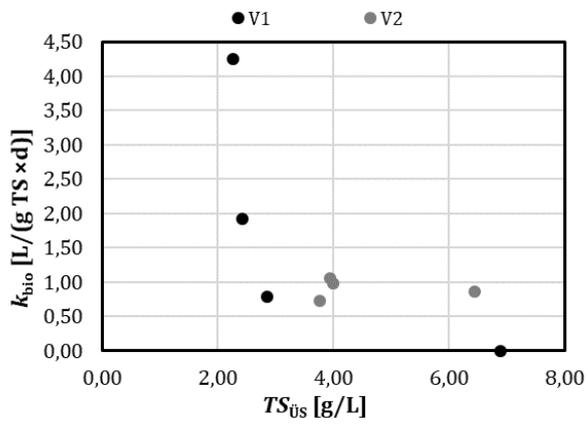
A: Coffein



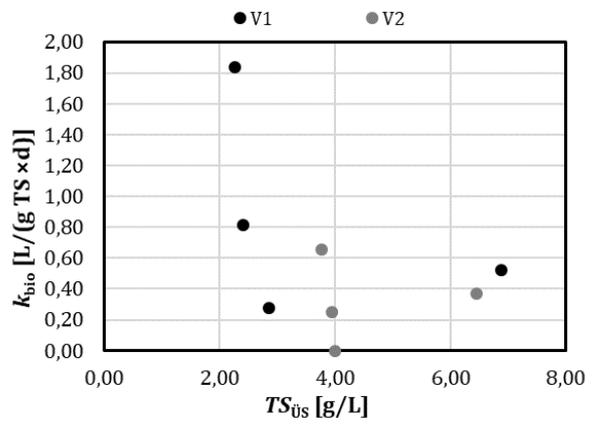
B: Ibuprofen



C: Metformin



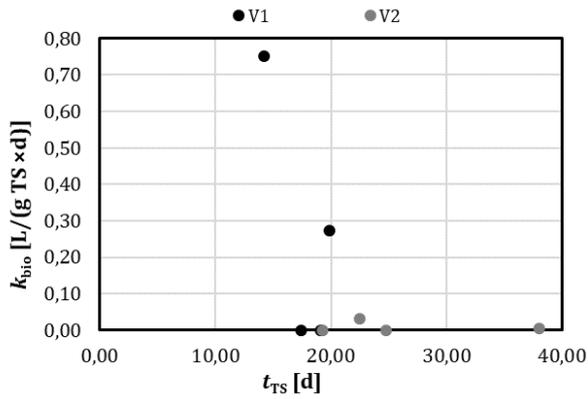
D: Acesulfam-K



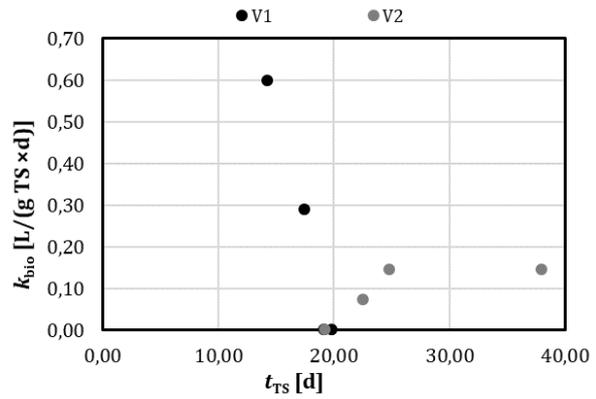
### 2.3 Einfluss des Schlammalters $t_{TS}$

#### Stoffgruppe I

A: Carbamazepin

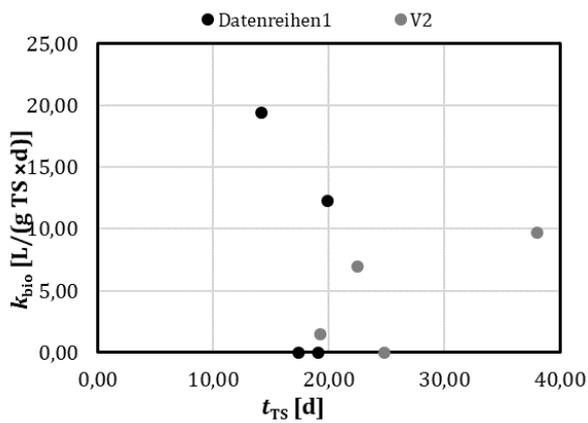


B: Imidacloprid

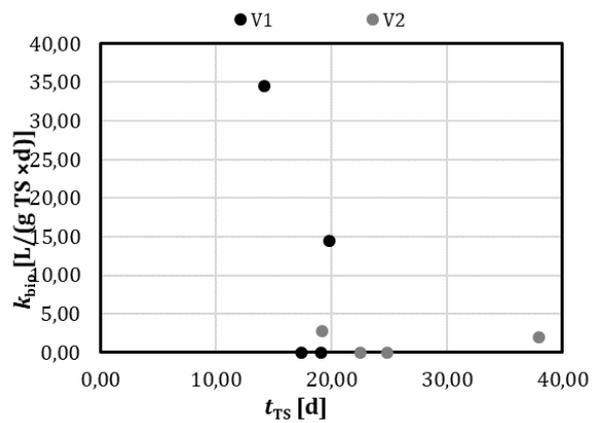


#### Stoffgruppe II

A: Nickel

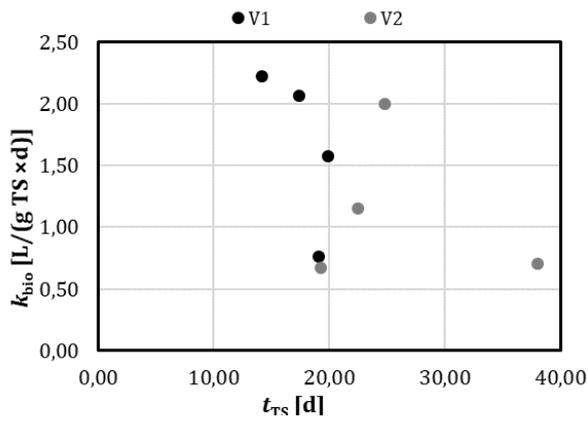


B: Flouranthen

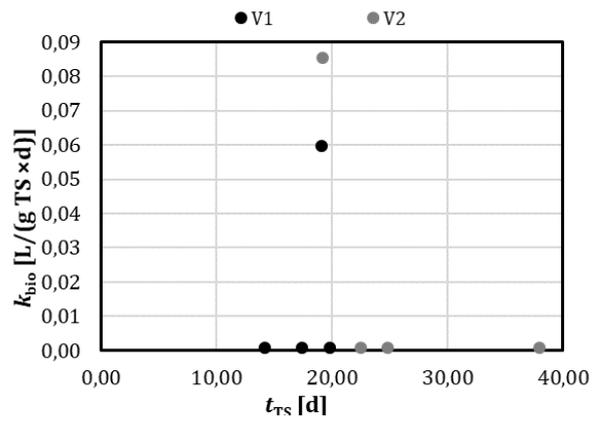


Stoffgruppe III

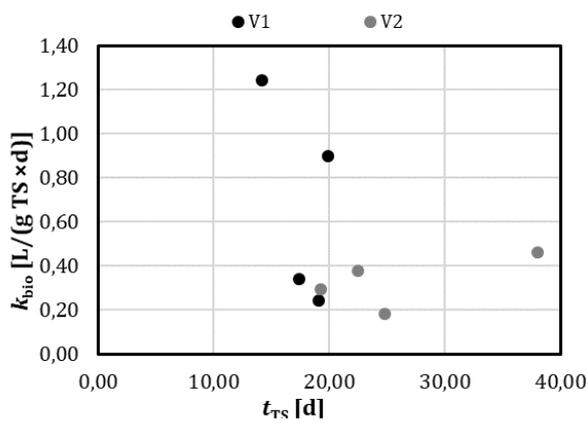
**A: Ciprofloxacin**



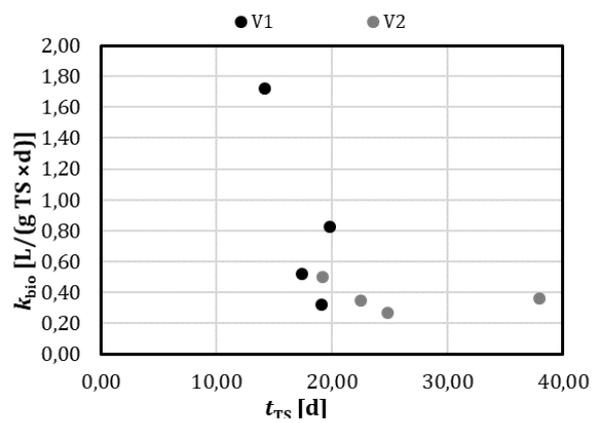
**B: Diclofenac**



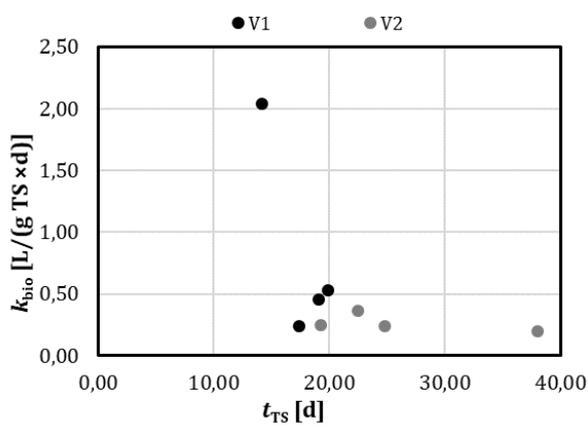
**C: Gabapentin**



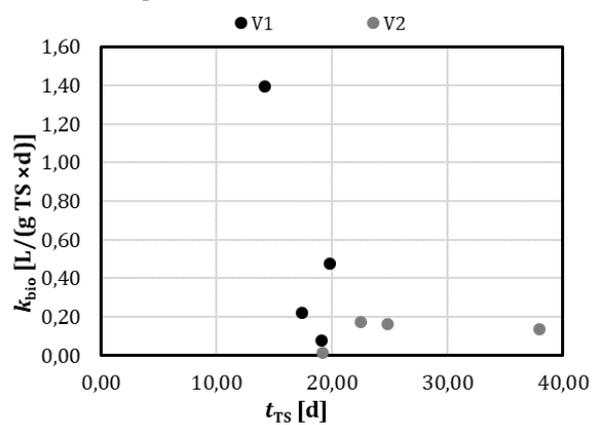
**D: Metoprolol**



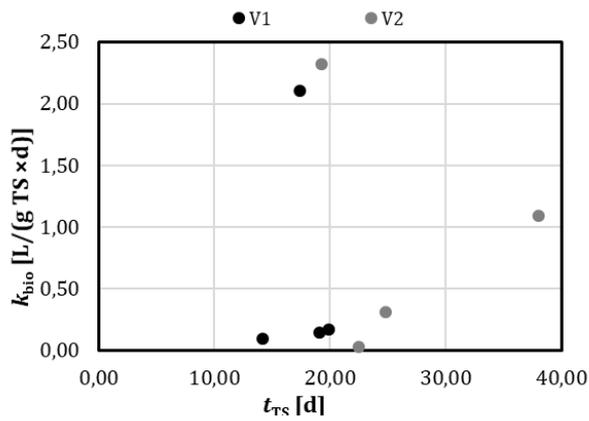
**E: Sulfamethoxazol**



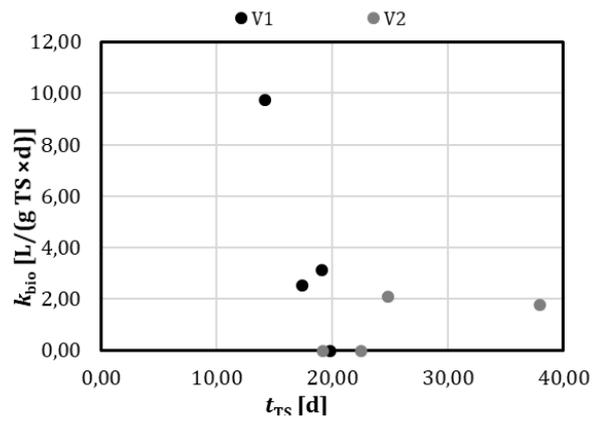
**F: Trimethoprim**



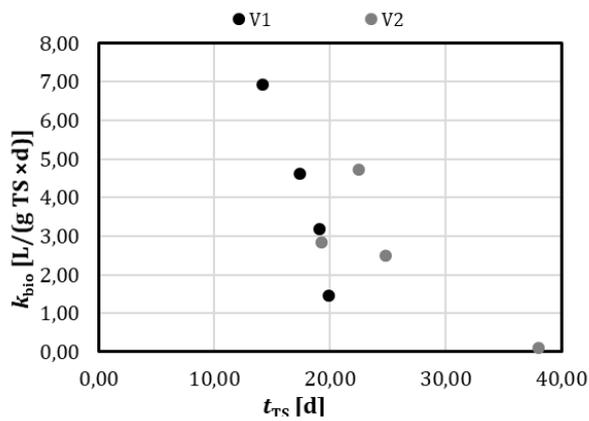
**G: Glyphosat**



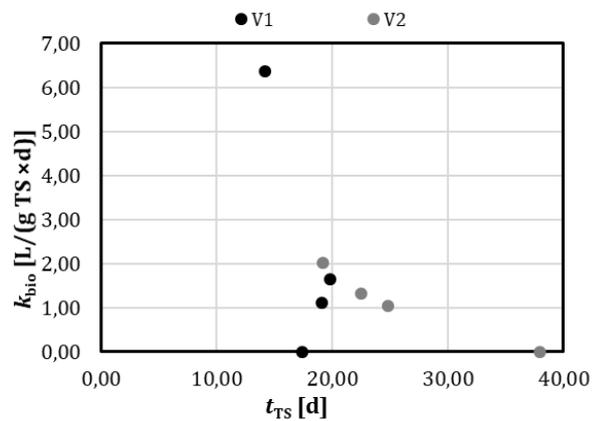
**H: Naphthalin**



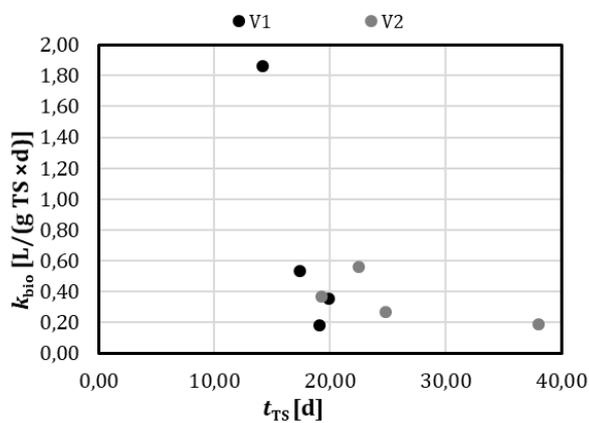
**I: Phenanthren**



**J: Bisphenol A**



**K: Benzotriazol**

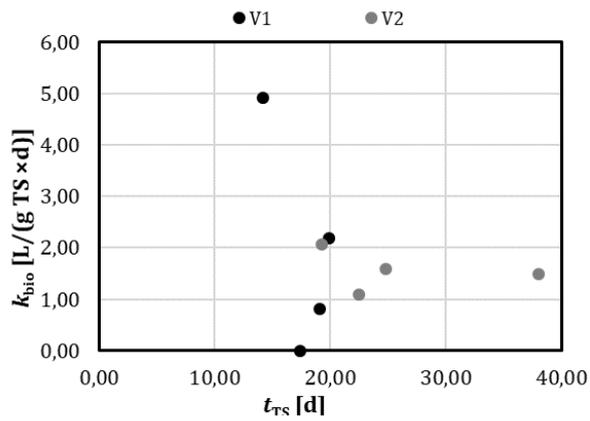


*Stoffgruppe IV*

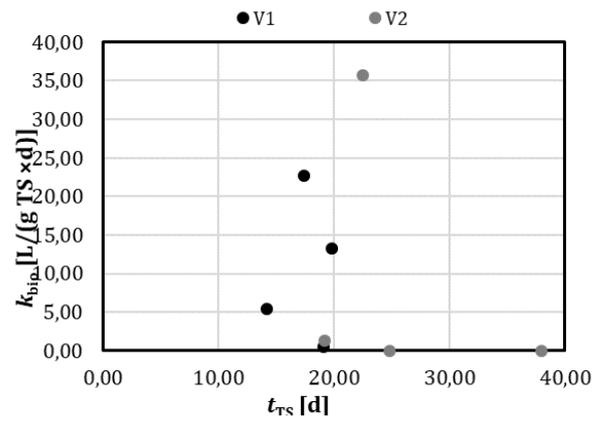
- keine Daten -

## Stoffgruppe V

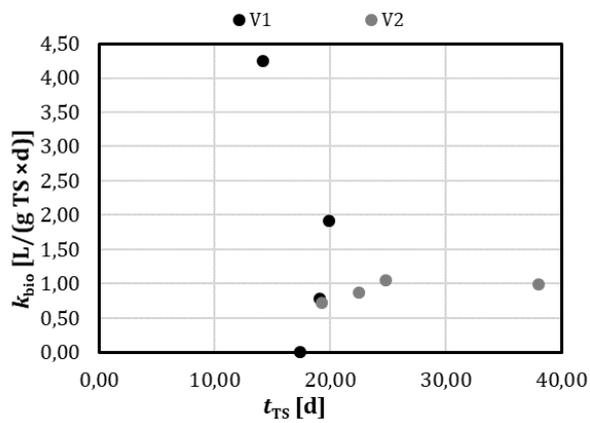
A: Coffein



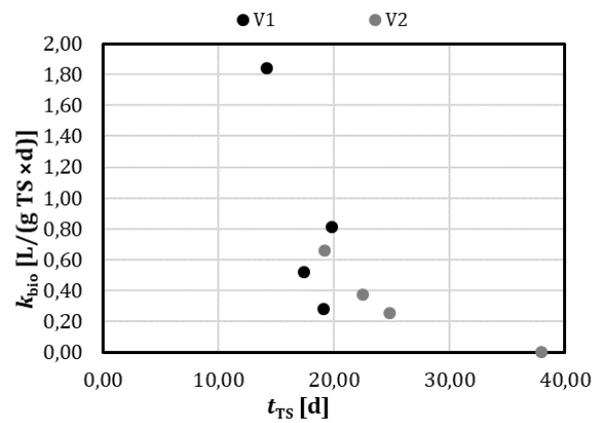
B: Ibuprofen



C: Metformin



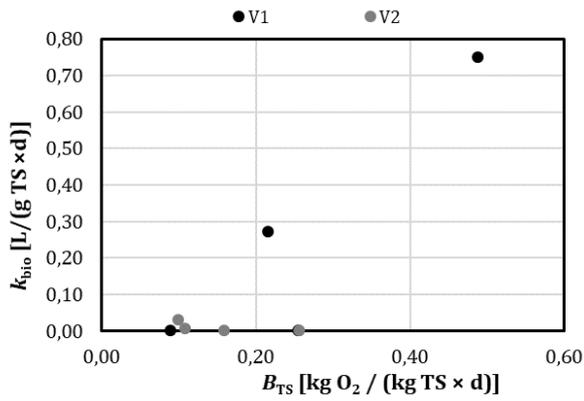
D: Acesulfam-K



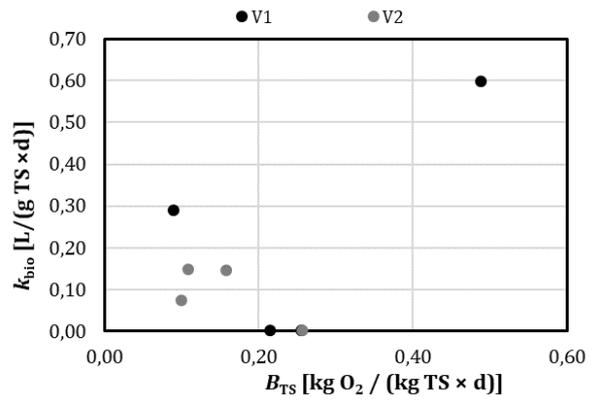
## 2.4 Einfluss der Schlammbelastung $B_{TS}$

### Stoffgruppe I

A: Carbamazepin

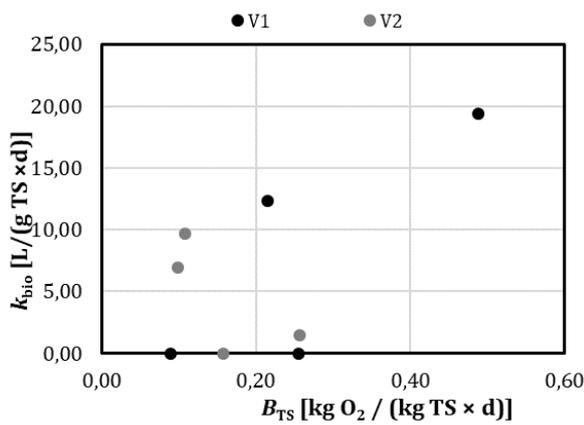


B: Imidacloprid

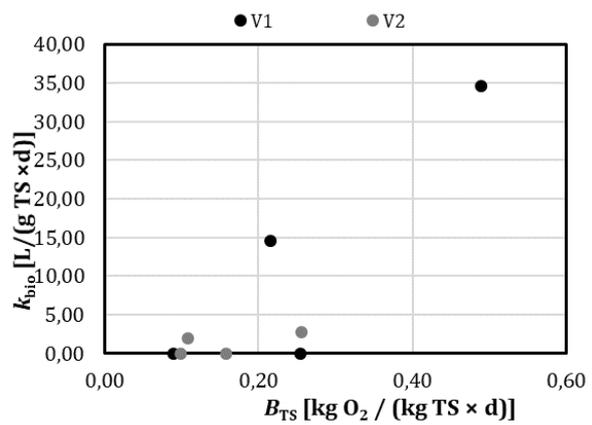


### Stoffgruppe II

A: Nickel

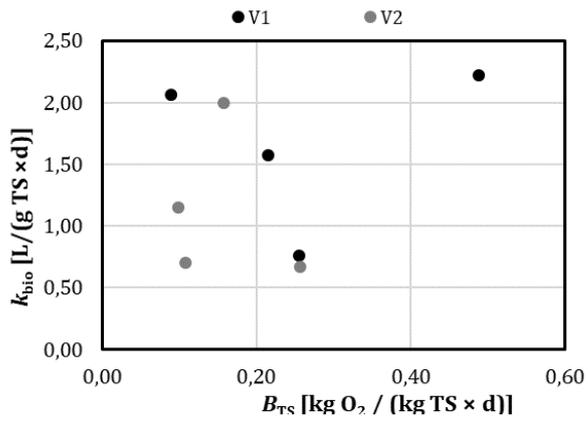


B: Flouranthen

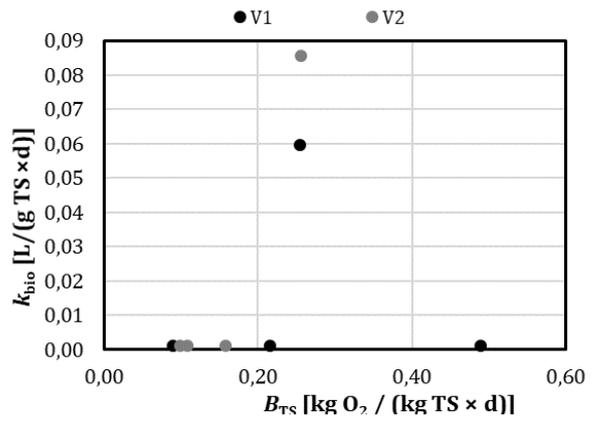


Stoffgruppe III

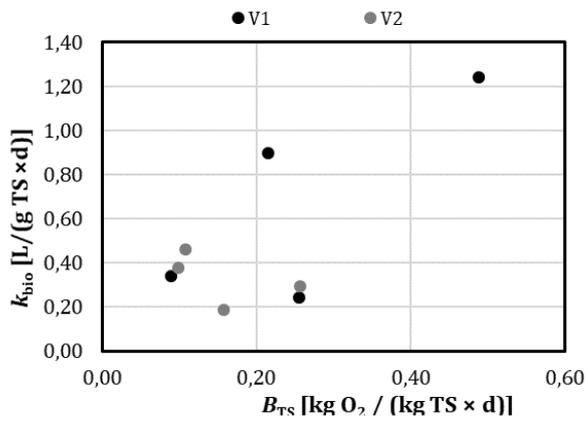
A: Ciprofloxacin



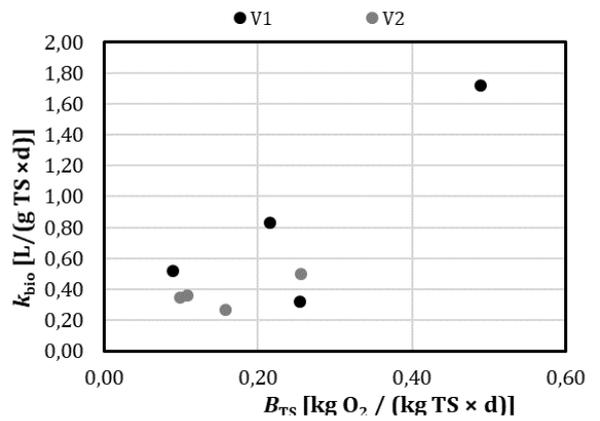
B: Diclofenac



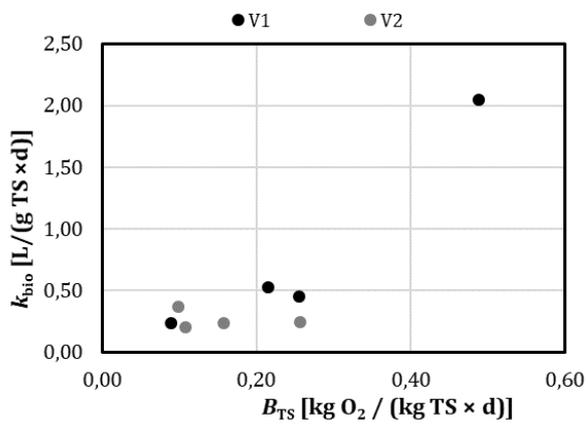
C: Gabapentin



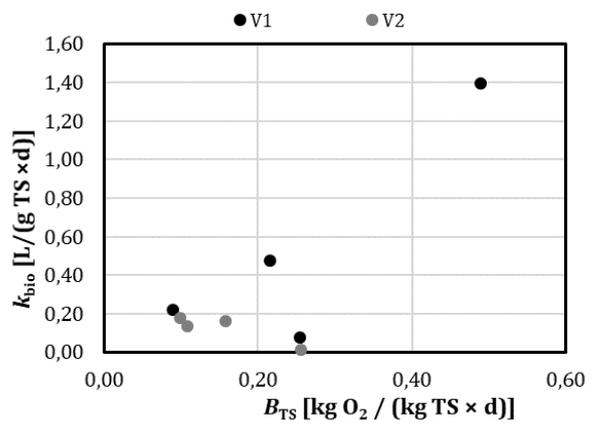
D: Metoprolol



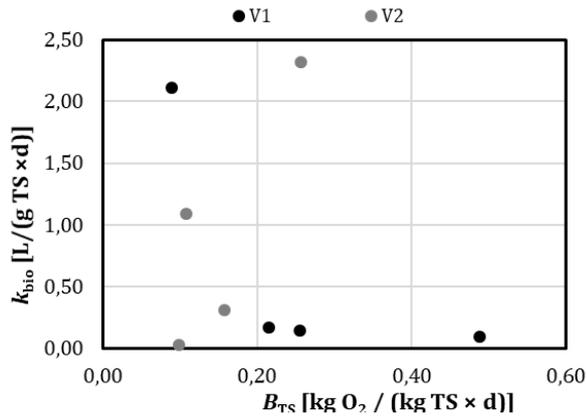
E: Sulfamethoxazol



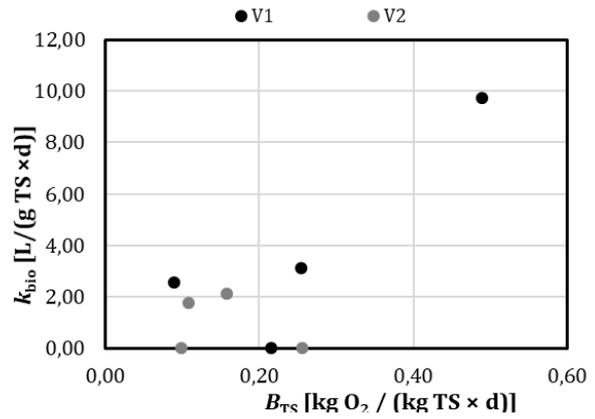
F: Trimethoprim



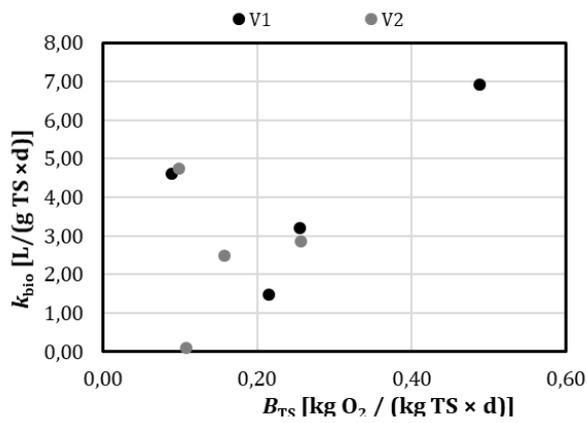
**G: Glyphosat**



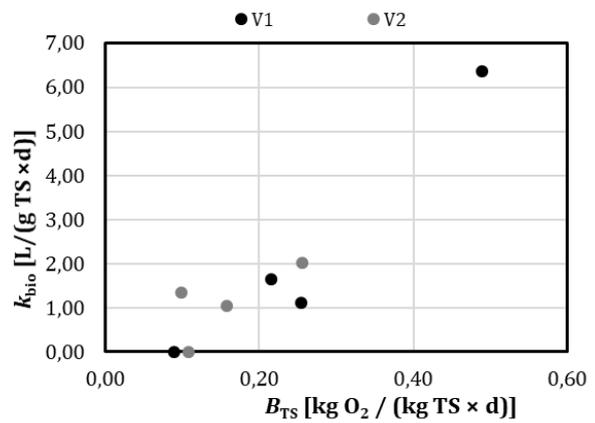
**H: Naphthalin**



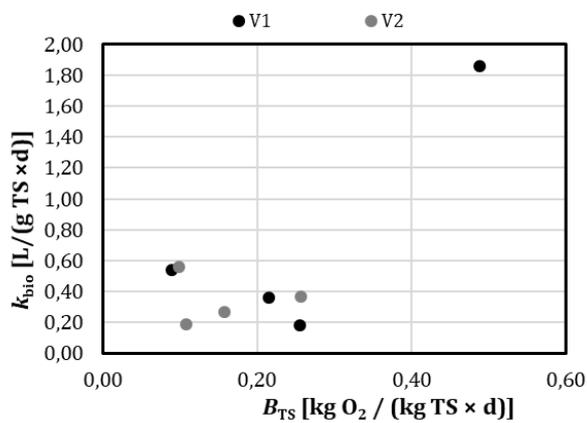
**I: Phenanthren**



**J: Bisphenol A**



**K: Benzotriazol**

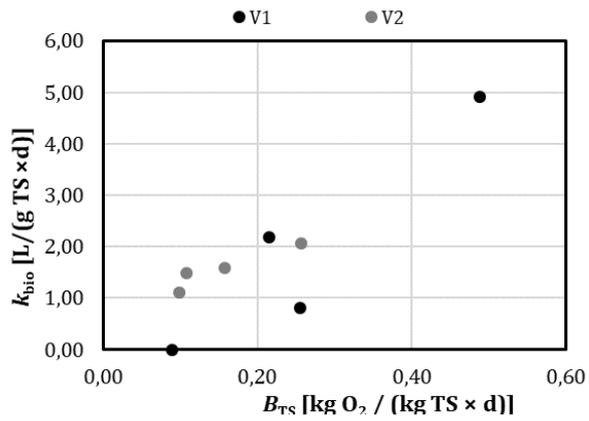


*Stoffgruppe IV*

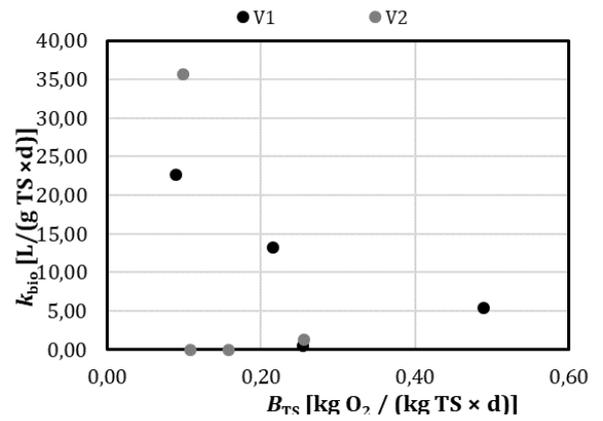
- keine Daten -

## Stoffgruppe V

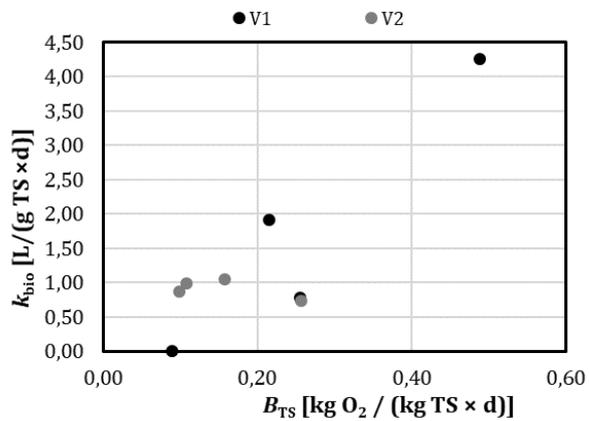
A: Coffein



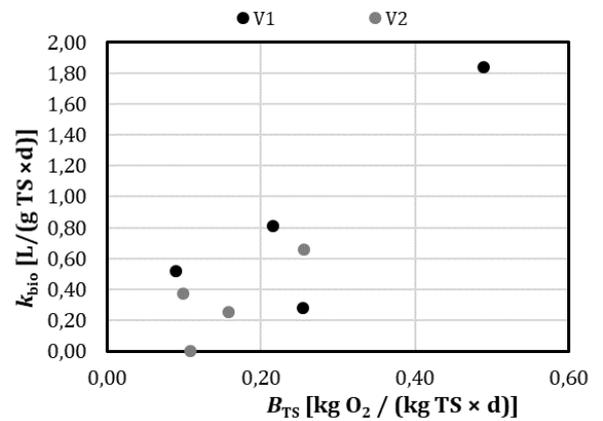
B: Ibuprofen



C: Metformin



D: Acesulfam-K





## Anhang 5 – Vergleich der Ergebnisse beider Projektphasen

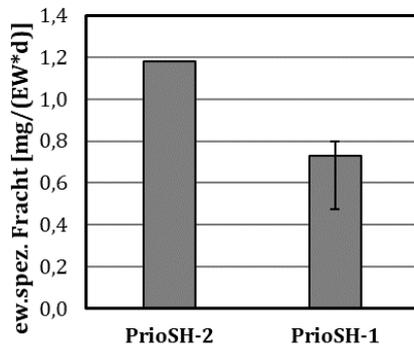
**Anmerkung:** Es werden die einwohnerspezifischen Frachten der beiden Projektphasen gegenübergestellt. Datengrundlage hierfür sind einerseits die charakteristischen Frachten des Routine-Messprogramms (Zulauf nach Rechen und Ablauf) gem. Abs. 9 des Abschlussberichtes der ersten Projektphase. Andererseits werden die im Rahmen des AP 3 der in der aktuellen Projektphase ermittelten Frachten berücksichtigt.

Dargestellt sind nur die Spurenstoffe, für die Daten vorliegen.

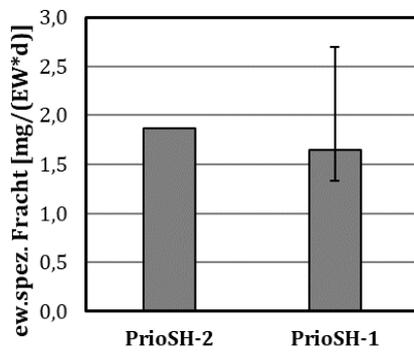
1	Schwermetalle.....	252
2	Arzneistoffe .....	253
3	Pflanzenschutzmittel.....	256
4	PAKs.....	257
5	Sonstige .....	261

# 1 Schwermetalle

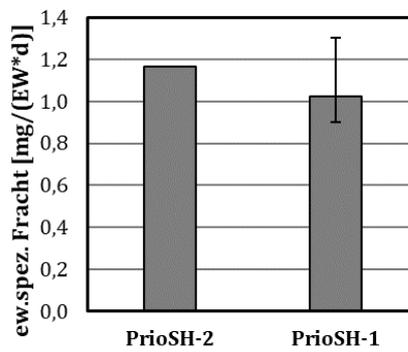
Zulauf: Blei



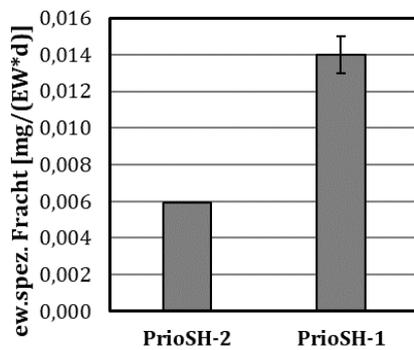
Zulauf: Nickel



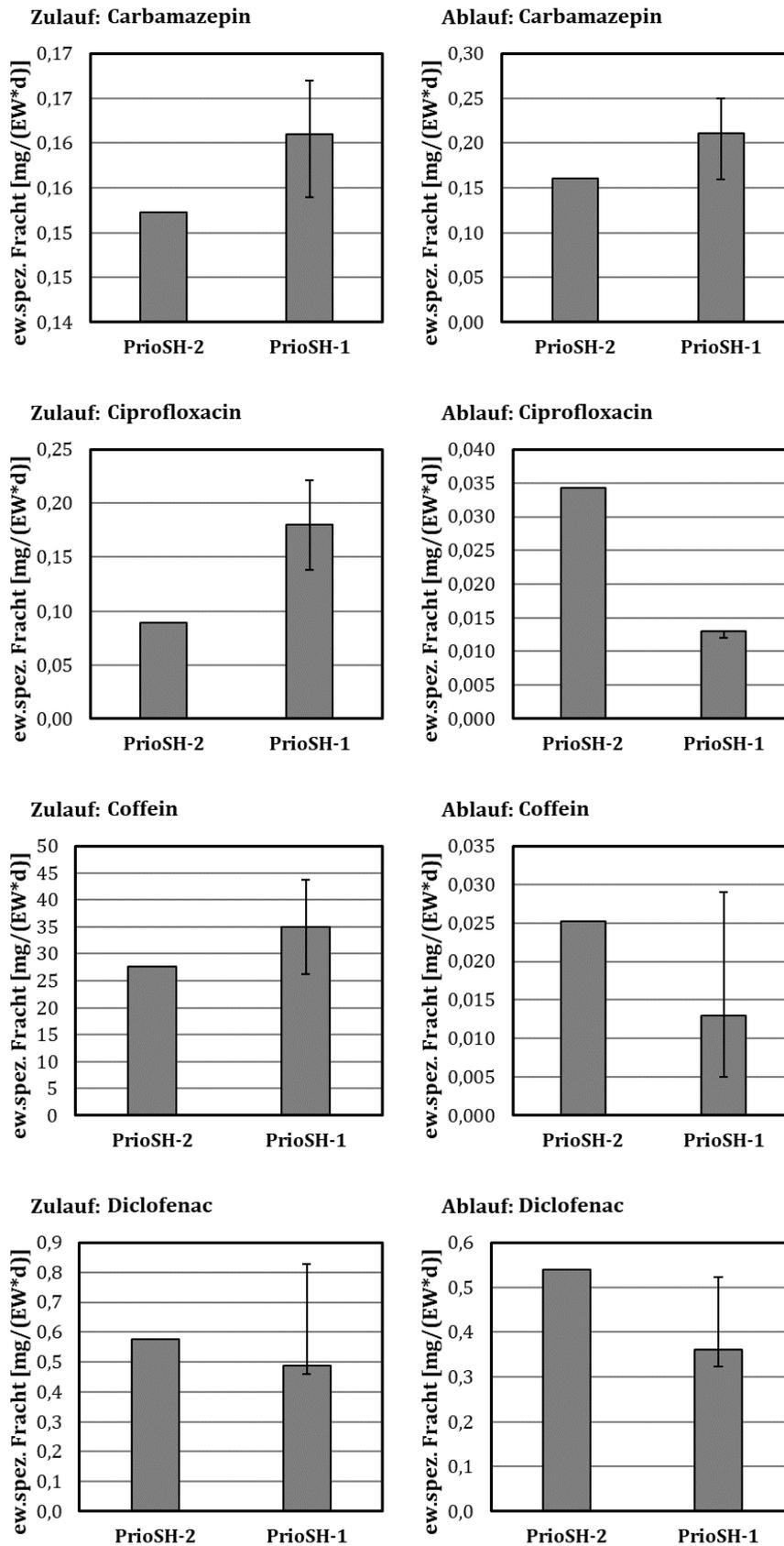
Ablauf: Nickel

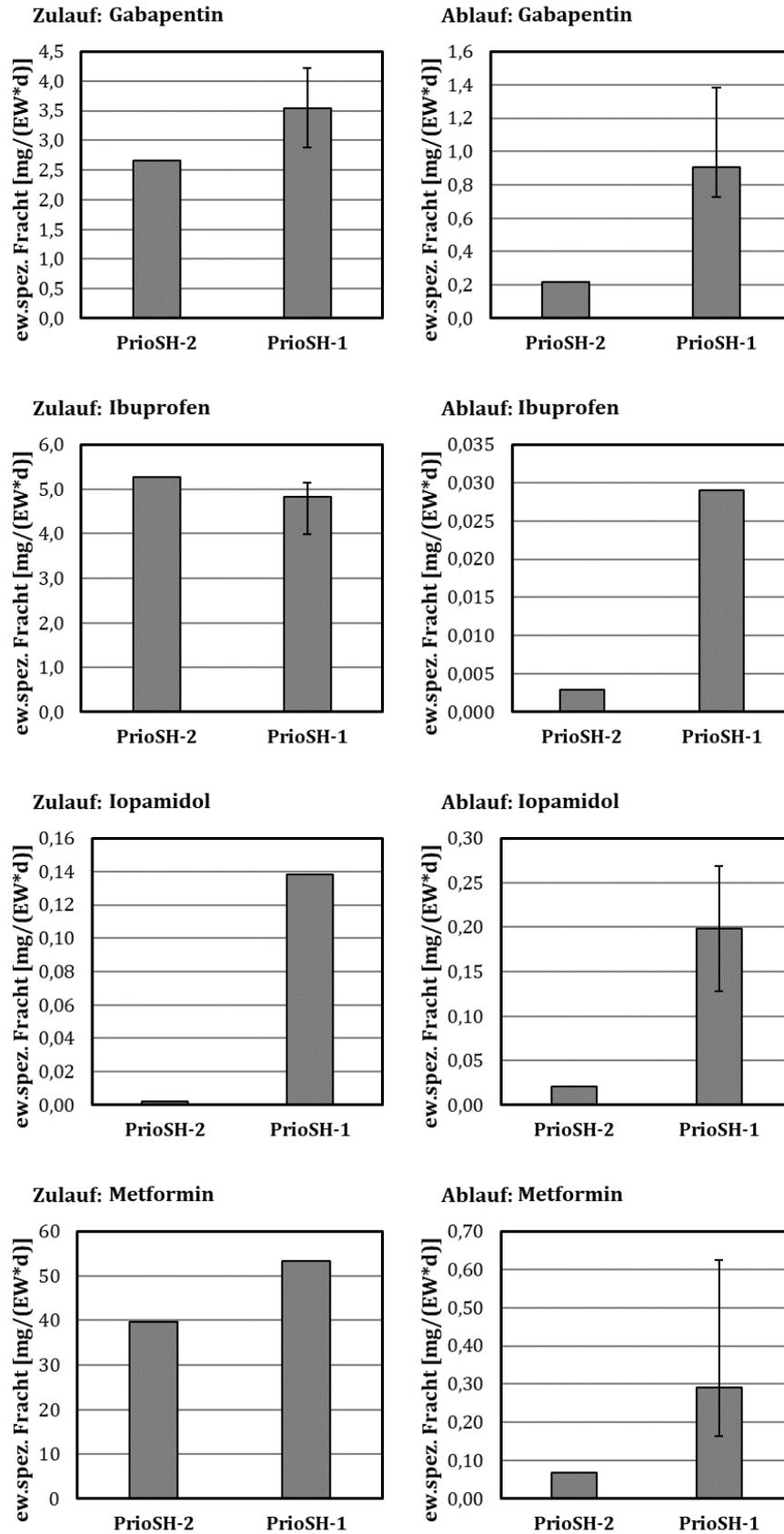


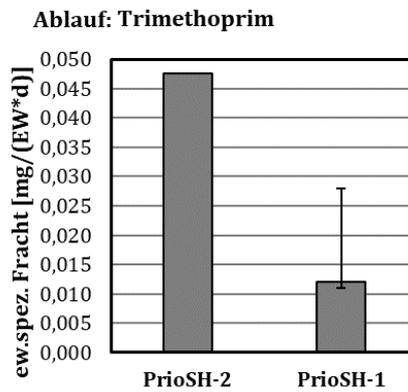
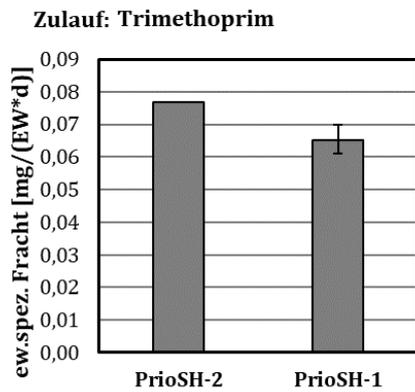
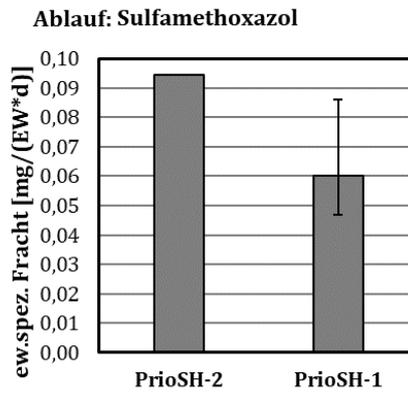
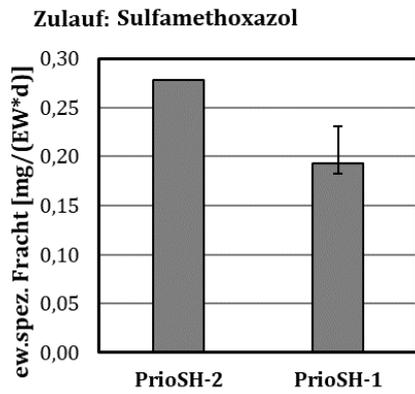
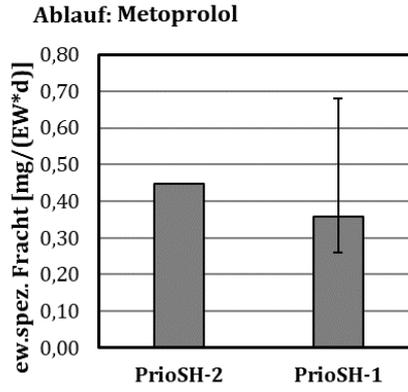
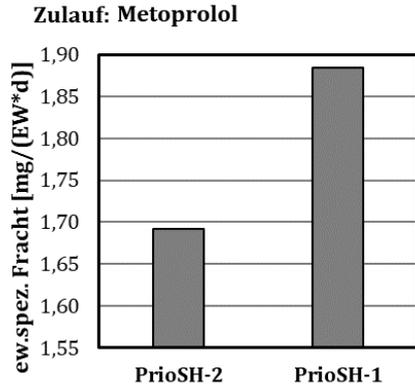
Zulauf: Quecksilber



## 2 Arzneistoffe

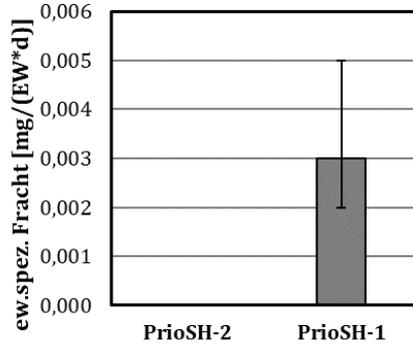




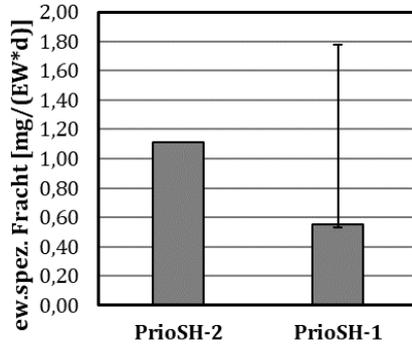


### 3 Pflanzenschutzmittel

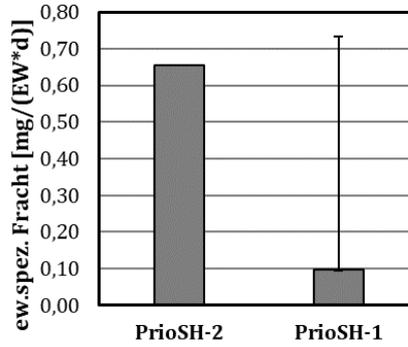
**Ablauf: Diuron**



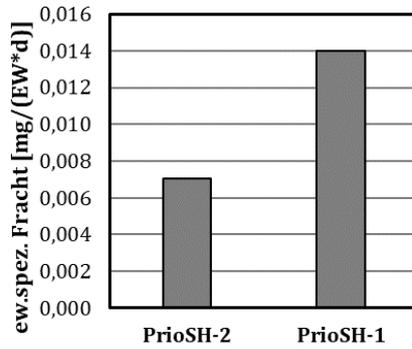
**Zulauf: Glyphosat**



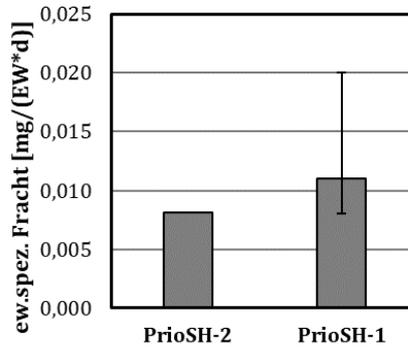
**Ablauf: Glyphosat**



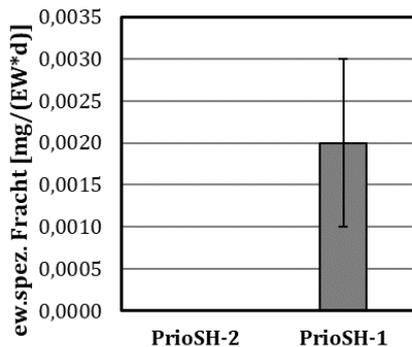
**Zulauf: Imidacloprid**

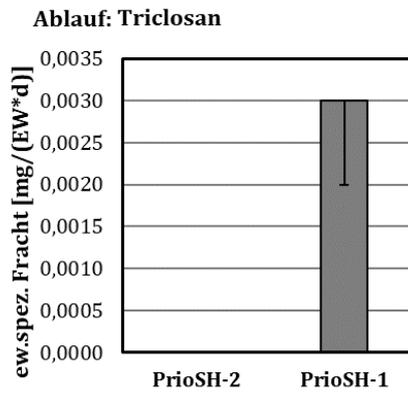
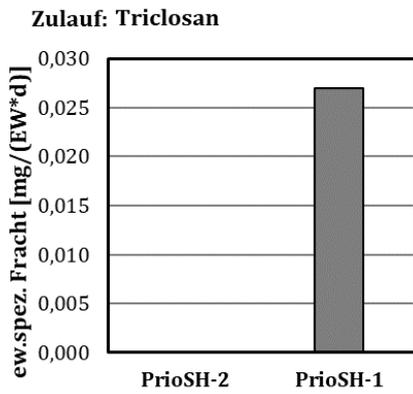
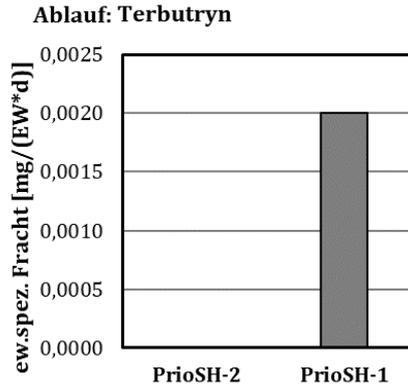
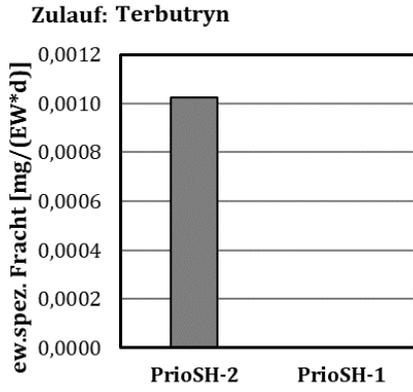


**Ablauf: Imidacloprid**

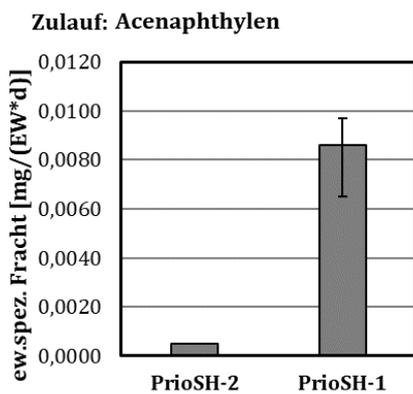
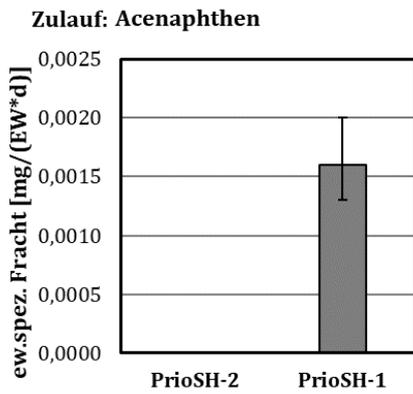


**Ablauf: Isoproturon**

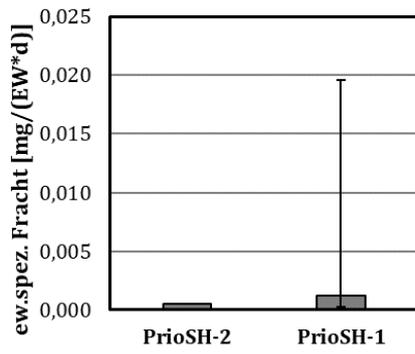




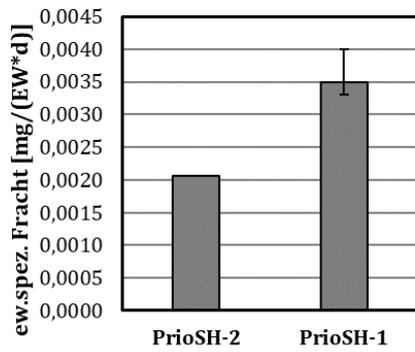
## 4 PAKs



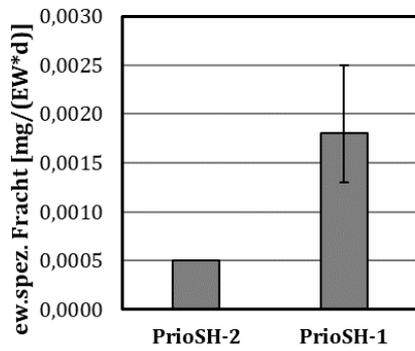
Zulauf: Anthracen



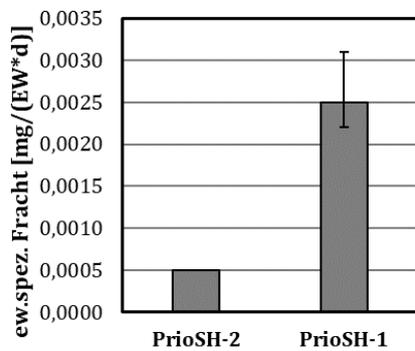
Zulauf: Benzo[a]anthracen

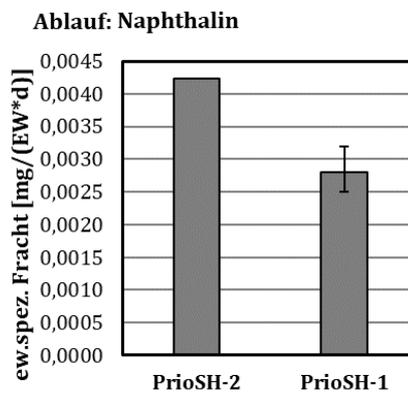
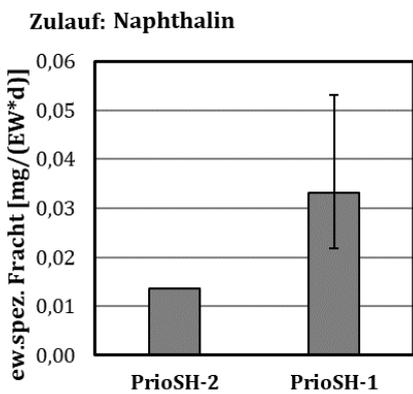
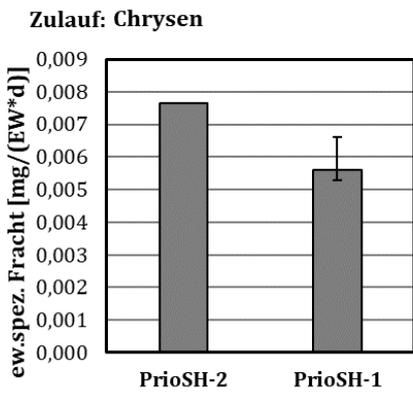
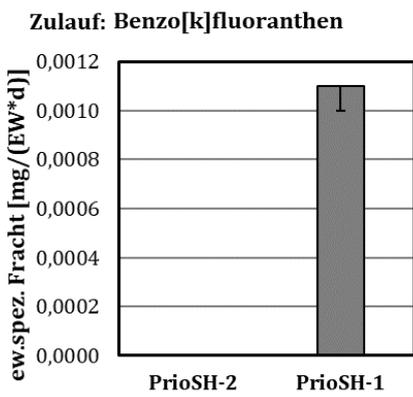
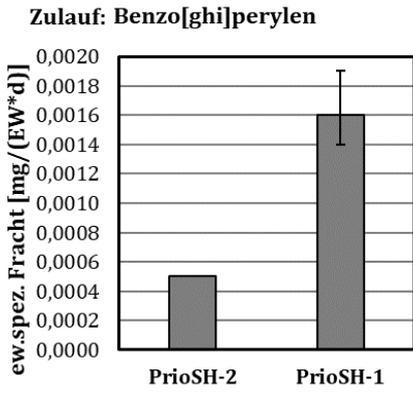


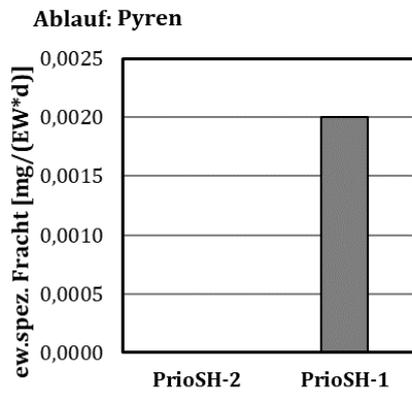
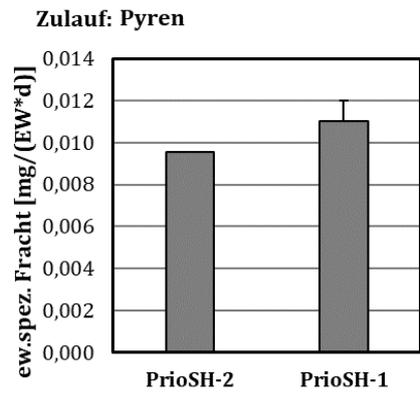
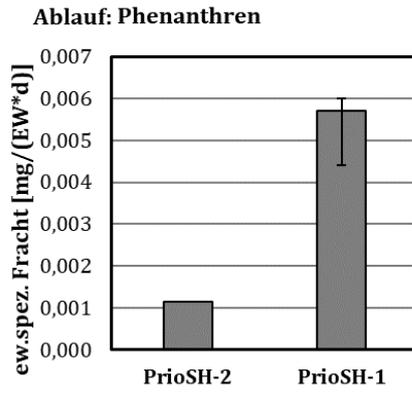
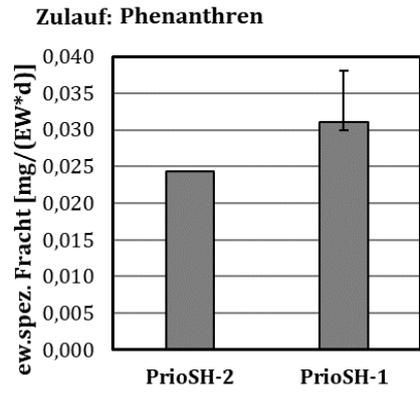
Zulauf: Benzo[a]pyren



Zulauf: Benzo[b]fluoranthen







## 5 Sonstige

